



IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO DE SIMULACIÓN DE OPERACIONES COMO HERRAMIENTA PARA LA EVALUACIÓN Y TOMA DE DECISIONES SOBRE LAS NECESIDADES HÍDRICAS DEL CANAL AMPLIADO

Jaime Massot Hernández

Octubre 2012

Departamento de Ambiente, Agua y Energía

División de Agua

Sección de Recursos Hídricos

IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO DE SIMULACIÓN DE OPERACIONES COMO HERRAMIENTA PARA LA EVALUACIÓN Y TOMA DE DECISIONES SOBRE LAS NECESIDADES HÍDRICAS DEL CANAL AMPLIADO

Por:

Jaime Massot Hernández

Hidrólogo

Corozal

Octubre 2012

Índice general

Índice de figuras

I. INTRODUCCIÓN

"*Desde la década de 1930, todos los estudios para la ampliación del Canal han coincidido en que la opción más eficaz y eficiente para dotar al Canal de mayor capacidad es la construcción de un tercer juego de esclusas de dimensiones mayores que las construidas en 1914. Así, en 1939, Estados Unidos inició la construcción de esclusas diseñadas para permitir el tránsito de buques mercantes y de guerra cuyas dimensiones excedían las de las esclusas existentes. Después de adelantar significativamente las excavaciones, los estadounidenses suspendieron los trabajos del tercer juego de esclusas en 1942 debido a su entrada en la segunda guerra mundial.*" [1]

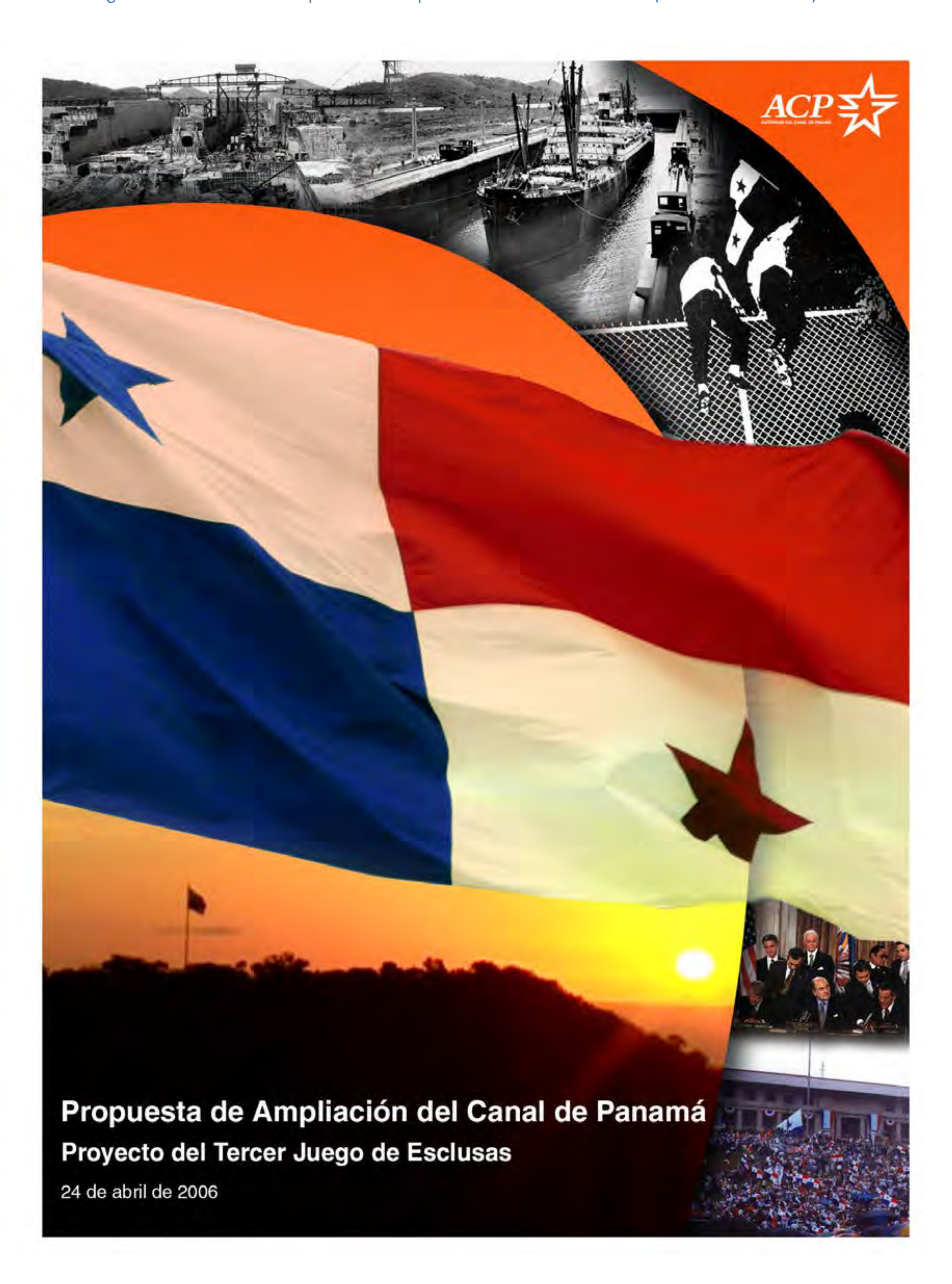
"*En la década de 1980, la comisión tripartita integrada por Panamá, Japón y los Estados Unidos retomó el tema y, al igual que los norteamericanos en 1939, determinó que un tercer juego de esclusas, con cámaras de mayor tamaño que las existentes, era la alternativa más apropiada para dotar al Canal de mayor capacidad. Hoy, los estudios que desarrolló la Autoridad del Canal de Panamá (ACP) como parte de su Plan Maestro 2005-2025 confirman que un tercer juego de esclusas más grandes que las actuales es la manera más apropiada, rentable y ambientalmente responsable de aumentar la capacidad del Canal y de permitir que la ruta marítima de Panamá continúe creciendo.*"[2]

Desde el final de la década de los 90, a la fecha, "*los objetivos de la expansión del Canal, de acuerdo a la Propuesta de Ampliación del Canal de Panamá, son: (1) hacer crecientes y sostenibles a largo plazo los aportes a la sociedad, a través de los pagos que el Canal hace al Tesoro Nacional; (2) mantener tanto la competitividad del Canal como el valor de la ruta marítima de Panamá para la economía nacional; (3) aumentar la capacidad del Canal para captar la creciente demanda de tonelaje con niveles de servicio apropiados para cada segmento de mercado y (4) hacer que el Canal sea más productivo, seguro y eficiente.*"[3]

---

[1] Autoridad del Canal de Panamá, Propuesta de Ampliación del Canal de Panamá / Fundamentos de la propuesta, 24 de abril de 2006, página 15.
[2] Ibid.
[3] Ibid., Objetivos de la ampliación de la capacidad del Canal mediante la construcción del tercer juego de esclusas, páginas 1-2.

Figura 1 - Portada de la Propuesta de Ampliación del Canal de Panamá (24 de abril de 2006)



"*El costo de la construcción del tercer juego de esclusas se estimó en aproximadamente B/.5,250 millones. Este estimado incluyó los costos directos e indirectos de diseño, administración, construcción, pruebas, mitigación ambiental y puesta en marcha.*"[4] "*El costo más relevante del proyecto corresponde a la construcción de los dos nuevos complejos de esclusas – uno en el Atlántico y el otro en el Pacífico.*"[5]

"*Las nuevas esclusas con sus tinas de reutilización de agua tendrán un costo estimado total, incluyendo contingencias, de B/.3,350 millones. Las mejoras al suministro de agua tendrán un costo total estimado de B/.260 millones, que incluye B/.150 millones para la profundización de los cauces de navegación y B/.30 millones para elevar el nivel máximo de operación del lago Gatún, más una partida de B/.80 millones para contingencias.*"[6]

Figura 2 - Análisis de Alternativas de Agua (Administración del recurso hídrico / figura 7-31)

Matriz de Análisis de Alternativas de Agua

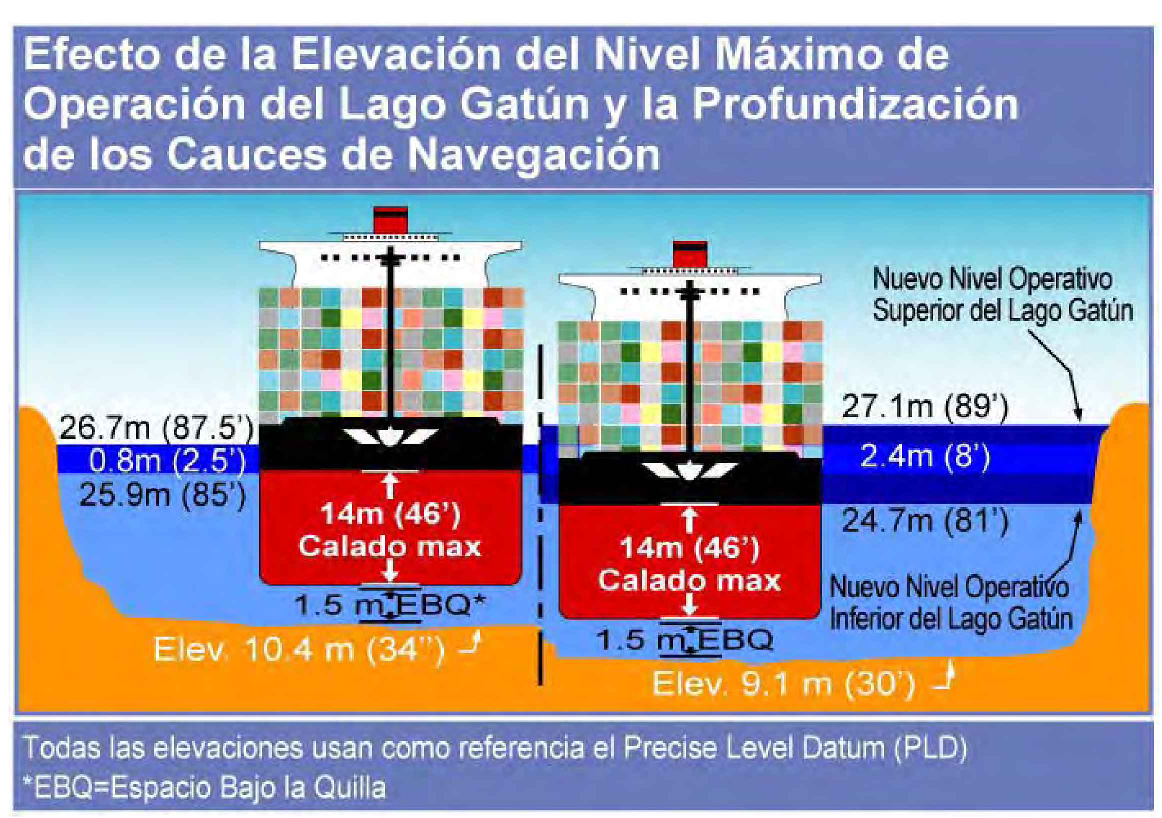
Criterio de Decisión	Tinas de Reutilización de Agua			Reciclaje de Agua*	Subir el Lago Gatún a 89'	Profundizar Cauces a 30' PLD	Opción de Trinidad*	Opción de Alto Chagres*	Opción de Río Indio*
	1 Tina*	2 Tinas*	3 Tinas						
Aspectos Técnicos y de Costo									
Rendimiento Hídrico (con 99% de confiabilidad volumétrica)	3 - 5 esclusajes	5 - 9 esclusajes	6 - 11 esclusajes	10 - 12 esclusajes	3-5 esclusajes	7-10 esclusajes	7 esclusajes	5 esclusajes	16 esclusajes
Costo de Inversión (en millones de balboas)	B/. 250 Millones	B/. 315 Millones	B/. 480 Millones	B/. 210 Millones	B/. 30 Millones	B/. 150 Millones	B/. 700 Millones	B/. 330 Millones	B/. 290 Millones
Aspectos Sociales y Ambientales:									
Impacto en Calidad de Agua (Posibilidad de intromisión de agua salada)	Poca Intromisión	Poca Intromisión	Poca Intromisión	Mucha Intromisión	Ninguna Intromisión	Ninguna Intromisión	Ninguna Intromisión	Ninguna Intromisión	Ninguna Intromisión
Personas Afectadas (número de personas)	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna	N / S	Ninguna	1,640 personas	263 personas	1,750 personas
Superficie Afectada Directamente (hectareas)	N / S	N / S	N / S	N / S	400 hectáreas	Ninguna	2,100 hectáreas	1,300 hectáreas	4,600 hectáreas
Impacto en la Biodiversidad (alto - regular - bajo)	Ningún impacto	Ningún impacto	Ningún impacto	Poco impacto en la biodiversidad	Ningún impacto	Ningún impacto	Pérdida de áreas boscosas	Pérdida de bosques primarios	Pérdida de áreas boscosas
Impacto Socio-Económico (alto - regular - bajo)	Ningún impacto	Ningún impacto	Ningún impacto	Ningún impacto	Adecuación de estructuras	Ningún impacto	Impacto en áreas rurales y semi-rurales	Impacto en áreas de reservas indígenas	Impacto en áreas rurales

N / S = No tiene impacto significativo
*Opciones descartadas en el análisis final

[4] Ibid., Costo estimado del tercer juego de esclusas, página 10.
[5] Ibid., página 11.
[6] Ibid., páginas 11-12.

"A fin de contar con el agua necesaria para satisfacer el consumo de la población y de las otras actividades humanas, y a la vez garantizar el funcionamiento del Canal ampliado con el tercer juego de esclusas, la ACP propuso las siguientes medidas: (1) construir tres tinas de reutilización de agua por cada cámara de las nuevas esclusas, es decir, 9 para cada complejo de esclusas, para un total de 18 tinas; (2) profundizar los cauces de navegación del lago Gatún, del nivel 10.4 m (34') PLD al nivel 9.1 m (30') PLD y (3) elevar aproximadamente 0.45 m (1.5') el nivel operativo máximo del lago Gatún, del nivel 26.7 m (87.5') PLD al nivel 27.1 m (89') PLD. La combinación de estos tres componentes permitirá al sistema hídrico del Canal suministrar, en promedio, unos 2,670 millones de galones de agua por día, agua suficiente para realizar un promedio de 48.5 esclusajes equivalentes por día. Además, estos tres componentes permitirán al Canal ofrecer un calado adecuado y competitivo en los cauces de navegación del lago Gatún para el funcionamiento del Canal ampliado con el tercer juego de esclusas, incluso cuando éste alcance su máxima capacidad sostenible, más allá del año 2025."[7]

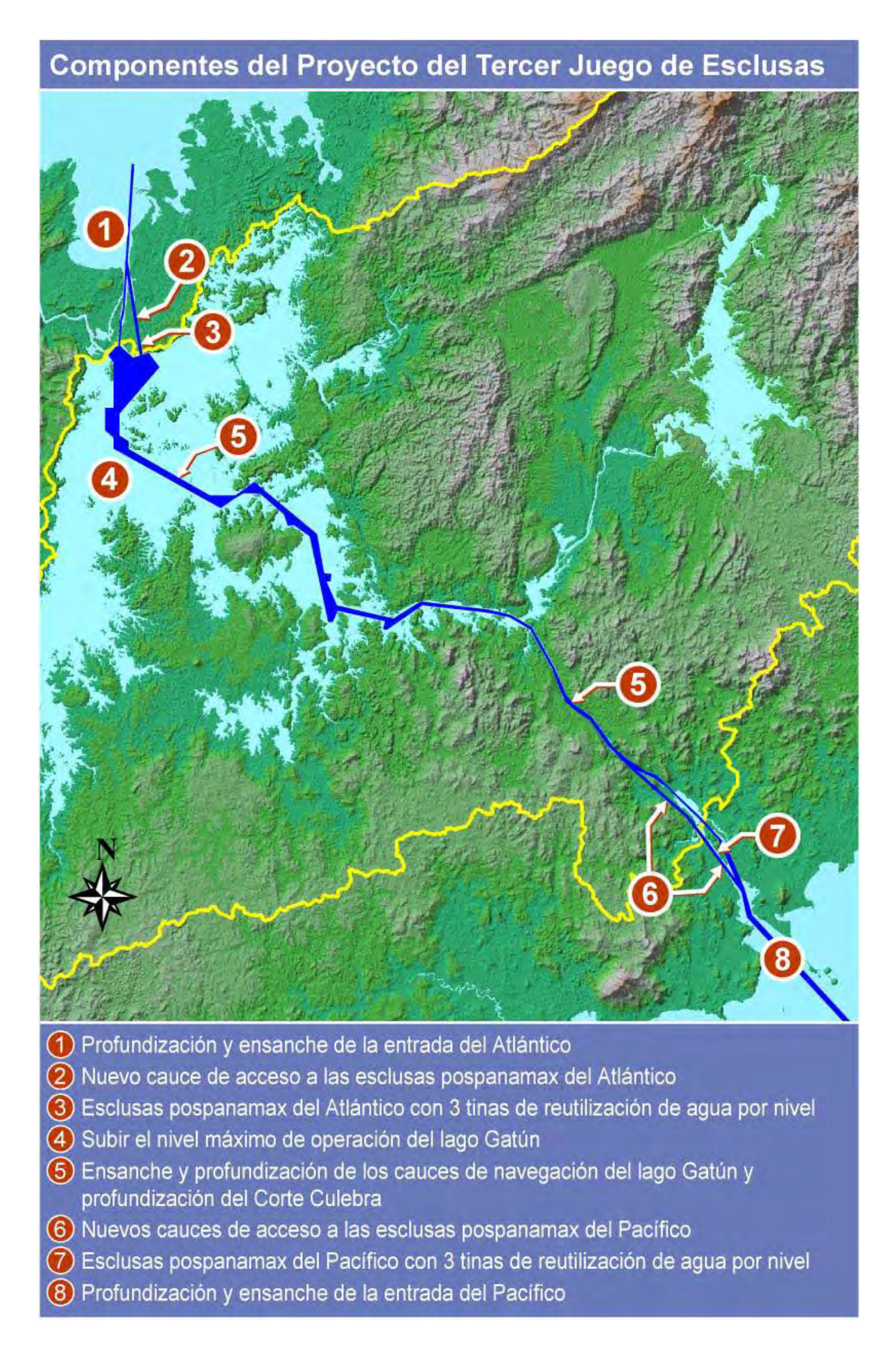
Figura 3 - Profundización del cauce del Canal (Administración del recurso hídrico / figura 7-33)



[7] Ibid., Suministro de agua, página 59.

Figura 4 - Componentes del proyecto de ampliación del Canal

Referencia[8]



[8] Ibid., Explicación del proyecto del tercer juego de esclusas, figura 1, página 3.

Dada la importancia del recurso hídrico para el funcionamiento eficiente del tercer juego de esclusas a partir del año 2014 y el riesgo de desabastecimiento de agua que afectaría el consumo humano e industrial de las ciudades de Panamá, Colón y áreas aledañas, en adición al tránsito de buques por el Canal; la gerencia de la Sección de Recursos Hídricos (EAAR) de la ACP asignó, al autor de este informe, el diseño, construcción, verificación y validación de un modelo de toma de decisiones utilizando los aportes (escorrentías netas) y demandas del Canal ampliado para los años 2015, 2020 y 2025. Este proyecto fue asignado inicialmente en agosto de 2011 y convertido, posteriormente, en meta de desempeño para el año fiscal 2012.[9]

A. Aspectos generales

1. Situación actual del problema

La construcción del tercer juego de esclusas, en el Canal de Panamá, es actualmente uno de los temas de mayor importancia en el ámbito nacional e internacional. Entre los diversos estudios realizados por el equipo interdisciplinario que redactó la propuesta de ampliación del Canal se concluye que: "*La ACP ha desarrollado un programa de suministro y ahorro de agua para el Canal ampliado que garantizará un suministro óptimo y oportuno, tanto para la población como para las operaciones de las esclusas actuales y del tercer juego de esclusas. Gracias a este programa, la ampliación del Canal con un tercer juego de esclusas no requerirá embalses de ningún tipo, por lo que todas las opciones de agua que consistían en embalses quedan descartadas, entre ella las opciones de Río Indio, Alto Chagres y Trinidad. El programa hídrico propuesto permitirá al Canal brindar calados atractivos, con un alto grado de confiabilidad, a los usuarios interesados en emplazar buques pospanamax en esta ruta. De igual manera permitirá mantener esta confiabilidad a largo plazo, a medida que la demanda de agua aumente. En resumen, el suministro hídrico de la Cuenca oriental*[10] *será suficiente para satisfacer las necesidades de agua de la población y la operación del Canal, simultánea y continuamente, más allá del año 2025, sin necesidad de embalses.*"[11]

---

[9] ESPINOSA Jorge, Expectativas de Desempeño del Año Fiscal 2012, 13 de enero de 2012.
[10] También conocida como Cuenca Tradicional o Cuenca del Río Chagres. La Región Occidental fue excluida de la cuenca del Canal con la derogación de la Ley 44 del 31 de agosto de 1999.
[11] Autoridad del Canal de Panamá, Administración del recurso hídrico, 7 de junio de 2006, página 38.

Figura 5 - Listado de las 29 posibles fuentes de agua estudiadas para el Canal ampliado

Referencia [12]

Opciones de Suministro de Agua Estudiadas para el Canal Ampliado

Número	Proyecto	Reconocimiento	
		Inicial	Detallado
1*	Embalse de Río Indio	✓	✓
2*	Embalse de Coclé del Norte	✓	✓
3*	Embalses de Rio Toabre and Rio Caño Sucio	✓	✓
4*	Embalse de Río Lagarto	✓	✓
5*	Embalse de Rio Salud	✓	✓
6*	Embalse de Rio Piedras	✓	
7*	Embasle de Río Cuango	✓	
8*	Embalse de Rio Caimito	✓	✓
9*	Embalse de Rio Pacora	✓	✓
10*	Embalse del Río Trinidad Abajo	✓	✓
11*	Embalse del RíoTrinidad Arriba	✓	
12*	Embalse de Rio Alto Chagres	✓	✓
13*	Embalse del Rio Pequeni	✓	
14*	Embalse del Rio Ciri Grande	✓	✓
15*	Embalse del Río Caño Quebrado	✓	
16*	Embalse del Rio Caño Sucio	✓	✓
17	Elevar el nivel Máximo de operación del Lago Gatún a 27.1m (89') PLD	✓	✓
18	Profundizar los cauces de navegación del Lago Gatún 0.9m (3')	✓	✓
19*	Elevar el nivel máximo de operación del Lago Alajhuela 0.6m y 1.2m (2' and 4')	✓	✓
20*	Elevar el nivel de operación del Lago Miraflores 16.8 m (55') PLD	✓	
21*	Embalse bombeado en el Lago Alajhuela	✓	
22*	Bombear agua del subsuelo a la Cuenca del Canal	✓	
23*	Embalse bombeado y generación entre Coclé del Norte y Toabre	✓	✓
24*	Compuertas de mareas	✓	
25*	Bajar el Lago Gatún a una elevación de 16.8m (55')PLD y eliminarla cámara superior de las esclusas	✓	
26*	Reducir pérdidas por filtración y evaporación de los Lagos Gatún y Alajhuela	✓	
27*	Bombear agua salada al Lago Gatún	✓	✓
28*	Reciclar el agua que se utiliza en los esclusajes	✓	✓
29	Tinas de Ahorro de Agua	✓	✓

*Opciones descartadas en el análisis final

[12] Ibid., Alternativas para satisfacer las necesidades de agua del Canal ampliado, figura 7-29, página 21.

Anteriormente, otras publicaciones como el Estudio de Alternativas del Canal (CAS), de 1993, descartaron la necesidad de embalses si se construía un tercer juego de esclusas (por lo menos durante sus primeros 40 años de funcionamiento). Investigaciones posteriores como el "*Análisis de las conclusiones del estudio de las alternativas al Canal de Panamá mediante la aplicación de un modelo de simulación de operaciones*"[13] demostraron, científicamente, que los planteamientos utilizados por el CAS impidieron un análisis real de los períodos críticos de almacenamiento, por ejemplo, un período de doce meses de escorrentías mínimas seguido de una estación seca promedio (de enero hasta abril). Esta situación de almacenamiento, que se ha presentado con anterioridad, pudiese repercutir severamente las operaciones del Canal si un tercer juego de esclusas funciona conjuntamente con las esclusas existentes aun cuando los tres componentes de aumento del rendimiento hídrico (subir el nivel del lago Gatún a 89 pies, profundizar los cauces de navegación a 30 pies y el uso de tinas de reciclaje de agua), funcionen a plena capacidad. Al estudiar y simular, los escenarios de demanda del Canal ampliado para los años 2015, 2020 y 2025, las futuras reglas de operación de los embalses o la pérdida de capacidad de almacenamiento del embalse de Alhajuela debido a los efectos de sedimentación, es posible concluir que los proyectos de almacenamiento adicional de agua, dentro o fuera de la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá (CHCP), pudiesen necesitarse antes de que el Canal alcance su máxima capacidad en el año 2025.

2. Objetivos

El objetivo general de este proyecto es implementar un modelo de simulación de operaciones como herramienta para la evaluación y toma de decisiones sobre las necesidades hídricas del Canal ampliado. Entre los objetivos específicos se tienen los siguientes:

a) Utilizar el modelo para simular los aportes de los últimos 20 años (1991-2010) y demandas esperadas en los periodos 2015-2034, 2020-2039 y 2025-2044. Determinar la confiabilidad para un calado de 50 pies y calado máximo para los escenarios pronosticados.
b) Determinar el calado máximo que el Canal de Panamá puede garantizar un 100% todo el año empleando un año normal y otro para el cuartil inferior.

[13] MASSOT Jaime, Análisis de las conclusiones del Estudio de las Alternativas al Canal de Panamá mediante la aplicación de un modelo de simulación de operaciones, 2000, páginas 71-72.

c) Comparar los resultados del modelo, en relación a las operaciones históricas realizadas en un periodo en particular, para evaluar si este optimiza el uso de los recursos hídricos del Canal o tiende a manejarlos en forma conservadora dependiendo de las reglas de operación según las prioridades de uso (consumo humano e industrial, tránsito de los buques o generación hidroeléctrica).

3. Definición de términos[14]

Algoritmo: conjunto prescrito de instrucciones o reglas bien definidas, ordenadas y finitas que permite realizar una actividad mediante pasos sucesivos que no generen dudas a quien deba realizar dicha actividad.

Año de flujos mínimos: periodo de 12 meses seguidos de escorrentía mínima que puede empezar en cualquier momento pero usualmente coincide con el final de la temporada seca, cuando el almacenamiento del embalse se encuentra en su punto más bajo, y continua hasta la siguiente época seca. En esencia, son los 12 meses de flujos mínimos de un periodo de dos años.

Aporte: Acción y efecto de depositar materiales de un río, un glaciar, el viento, etc.

Capacidad disponible: la cantidad de agua que puede ser retirada de un embalse que incluye el almacenaje disponible más la escorrentía neta durante el periodo en consideración.

Condición inicial: un valor que expresa el estado del sistema al principio de una simulación.

Confiabilidad de calado: indicador de la confiabilidad con la que el sistema de navegación puede proporcionar un calado máximo establecido.

Cuenca: territorio cuyas aguas afluyen todas a un mismo río, lago o mar.

Datos determinísticos: valores conocidos necesarios para calcular las salidas de una simulación.

Entrada: un valor numérico que es necesario para determinar las salidas de una simulación.

Esclusaje: el paso completo de un buque o un grupo de ellos de un océano a otro donde sólo una cámara de agua es derramada en las esclusas de Gatún y Pedro Miguel independientemente del número o tamaño de los buques.

Esclusaje equivalente: volumen de agua que utilizan las esclusas existentes durante el tránsito completo de un buque Panamax de un océano a otro. El volumen de agua de un esclusaje equivalente representa aproximadamente 0.21 MMC (55 millones de galones) de agua.

[14] Se han utilizado diversas fuentes de referencia en esta sección.

Escorrentía: volumen de agua que pasa por una corriente durante un período de tiempo. El período de tiempo generalmente usado es de un mes o un año.

Escorrentía neta: es la diferencia entre la escorrentía total menos la cantidad de agua perdida debido a la evaporación y la transpiración.

Longitud de la simulación: la cantidad de tiempo sobre la cual se lleva a cabo una simulación.

Modelo hidrológico: formulación matemática capaz de reproducir un fenómeno hidrológico natural considerado como un proceso.

Probabilidad: relación entre el número de resultados que producen un evento particular y el número posible de resultados.

Proceso: cualquier fenómeno que conlleva continuos cambios con respecto al tiempo.

Promedio: de una muestra de valores es igual a la suma de todos los valores dividido entre el número de sumandos.

Salida: objetivo de un estudio de simulación que tiene la forma de un valor numérico específico.

Sequía hidrológica: un periodo de tiempo anormalmente seco, lo bastante prolongado para dar lugar a una escasez de agua, que se refleja en la disminución, inferior a lo normal, de los niveles de escorrentía y los lagos.

Simulación por computadora: un modelo de computadora que imita el argumento real de un problema.

4. Delimitaciones (alcance)

a) En las simulaciones por computadora es posible obtener estimaciones bastante exactas y minimizar las probabilidades de error si se realizan un gran número de ensayos en cada simulación o éstas sean repetidas con diferentes escenarios, condiciones iniciales del sistema, datos determinísticos u otros. Para esta fase de implementación del modelo, se realizaron solamente las simulaciones necesarias, desde el punto de vista práctico, para obtener resultados confiables de acuerdo a las expectativas de desempeño del gerente de la Sección de Recursos Hídricos de la ACP.

b) Para el diseño y evaluación de proyectos de almacenamiento (embalses) pueden utilizarse datos determinísticos (aportes netos históricos) o modelos estocásticos (aportes generados de distribuciones probabilísticas). En esta fase sólo se utilizaron los datos determinísticos del periodo (1991-2010) recomendado por la gerencia.

c) Se mantuvo al mínimo el uso de estadísticas y probabilidades. La función primordial de este trabajo es simular una condición normal con base en información histórica disponible y empleando un modelo de simulación lo más sencillo posible.

d) El Sistema Internacional de unidades es el sistema oficial de medida de la ACP, sin embargo, este estudio utiliza el sistema inglés debido, fundamentalmente, a la familiaridad y uso común de las variables que componen el modelo.

5. Limitaciones (restricciones)

a) Debido a la complejidad del sistema y por razones de simplificación, el modelo de simulación no incluye todas las posibles variables que se dan en la realidad. No obstante, el modelo utilizado es una representación simplificada de las operaciones del Canal. Se recomienda, para estudios más especializados, programas disponibles en el mercado como, por ejemplo, HEC-ResSim versión 3.[15]

b) Las simulaciones fueron realizadas utilizando datos mensuales de aportes y demandas. Al emplear promedios mensuales se minimizan los efectos de los acontecimientos extremos en períodos de tiempo menores. Tanto los máximos como los mínimos diarios fueron promediados con los otros valores y los resultados, por consiguiente, tenderán a ser menos severos que en la realidad.

c) Durante el proceso de análisis, verificación y validación del modelo se hallaron inconsistencias y errores en los registros determinísticos utilizados.[16] Para verificar el correcto funcionamiento del modelo y por razones de tiempo, se aplicaron balances hídricos y corrigieron sólo los registros básicos requeridos para realizar las simulaciones pero no toda la serie histórica.

d) No fue posible modelar los efectos de pérdida de capacidad del embalse de Alhajuela ya que la tabla preliminar de elevación-capacidad, remitida en septiembre de 2012, aun se encuentra bajo revisión, aprobación y publicación oficial.

---

[15] http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ressim/

[16] MASSOT Jaime, Informe del proyecto de investigación, 19 de septiembre de 2011, páginas 17-22.

B. Justificación

1. Importancia

El Canal de Panamá es una de las principales empresas del país. "*La competitividad del Canal depende cada vez más de su capacidad de proporcionar, con un alto grado de confiabilidad, el nivel de servicio requerido por cada segmento de mercado. Una vez que el Canal alcance su máxima capacidad sostenible, el mismo perderá toda disponibilidad para permitir tránsitos adicionales y, con ello, la posibilidad de atender el crecimiento de la demanda.*"[17]

Con la construcción del tercer juego de esclusas se proyecta, para el año 2025, que "*se utilizarían unos 3,440 millones de metros cúbicos [121,500 MPC] de agua al año para la operación del Canal ampliado, suficiente agua para realizar 45.3 tránsitos completos por el Canal actual. Esto es menos agua de la que se necesitaría para manejar las proyecciones irrestrictas de necesidad de agua del Canal sin ampliación, principalmente debido a que se requerirá menos buques para llevar aproximadamente la misma carga utilizando buques tamaño pospanamax. El tercer juego de esclusas permitirá transitar más carga con menos agua, lo que se traduce en un uso más eficiente de este valioso recurso.*"[18] Por lo anterior, es imperativo realizar cuantos estudios sean necesarios para asegurar el éxito del proyecto y, por lo tanto, garantizar el suministro de agua para la población y el paso de buques por el Canal de Panamá al iniciarse las operaciones del tercer juego de esclusas.[19] Como se observará, más adelante, los pronósticos de uso de las aguas del Plan de Ampliación del Canal para el paso de los buques (esclusajes) y el consumo humano e industrial han sido actualizados (en este estudio) con la última información disponible.

---

[17] Autoridad del Canal de Panamá, Propuesta de Ampliación del Canal de Panamá / Proyecto del Tercer Juego de Esclusas, 24 de abril de 2006, página 43.
[18] Autoridad del Canal de Panamá, Proyecto de Ampliación del Canal / Preguntas y Respuestas Frecuentes, 17 de julio de 2006, página 24-25.
[19] Op. Cit., Capacidad Hídrica de la Región Oriental de la Cuenca del Canal, página 60.

2. Aporte

El modelo permite estimar si la configuración y administración del recurso hídrico del Canal ampliado podrá satisfacer las demandas pronosticadas para los años 2015, 2020 y 2025. Además, establece el calado máximo que el Canal puede garantizar un 100% para un año normal y otro para el cuartil inferior. El modelo simula, en forma continua, los aportes mensuales del periodo 1991-2000 y las futuras demandas para determinar el grado de confiabilidad para un calado de 50 pies y establece que calado puede mantenerse un 100% del tiempo.[20]

II. Revisión bibliográfica

A. Conceptos básicos sobre modelos de simulación

Desde los orígenes de la humanidad se ha intentado adivinar el futuro. La simulación ofrece, sobre bases ciertas, esa predicción del futuro, condicionada a supuestos previos. Para ello se construyen los modelos que son, normalmente, una simplificación de la realidad. Surgen de un análisis de todas las variables que intervienen en un sistema y de las relaciones que existen entre ellas. A medida que avanza el estudio del sistema se incrementa el entendimiento que el analista tiene del modelo y ayuda a crear modelos más cercanos a la realidad. [21]

En un modelo se estudian los hechos salientes de un sistema o proyecto. Se hace una abstracción de la realidad representándose el sistema o proyecto. El modelo que se construye debe tener en cuenta todos los detalles que interesan en el estudio para que realmente represente al sistema real. Por razones de simplicidad deben eliminarse, en primera instancia o aproximación, aquellos detalles que tengan menor relevancia y que lo complicarían innecesariamente. Se requiere pues, que el modelo sea una fiel representación del sistema real. No obstante, el modelo no tiene porqué ser una réplica de aquél. Consiste en una descripción del sistema, junto con un conjunto de reglas que lo gobiernan.[22]

---

[20] ESPINOSA Jorge, Expectativas de Desempeño del Año Fiscal 2012, 13 de enero de 2012.
[21] http://materias.fi.uba.ar/7526/docs/teoria.pdf
[22] Ibíd.

Simular, de acuerdo al diccionario de la Real Academia Española, es hacer que [algo] parezca real no siéndolo[23]. La simulación por computadora es una técnica en la cual se diseña y construye un modelo por computadora que imita el funcionamiento real de un proceso o sistema dado. Esto permite aprender cómo se comporta el sistema y obtener respuestas a preguntas como ¿qué sucedería si? Los modelos de simulación son una herramienta extremadamente importante para el análisis de sistemas complejos.

En los últimos años, el número de personas que utilizan la simulación para la resolución de problemas ha incrementado significativamente. Anteriormente visto como el último recurso, la simulación se está utilizando cada vez más en la planificación, diseño y control de sistemas. En este trabajo se considera la simulación como el proceso de diseño y ejecución de un modelo de administración de los recursos hídricos de la CHCP. Se emplea para comprender el funcionamiento del sistema de toma de decisiones y evaluar diferentes escenarios de operación que se pueden presentar en un futuro próximo. Se considerará que la simulación incluye tanto la construcción y evaluación del modelo, así como el estudio y análisis de diferentes escenarios.

El desarrollo de los modelos de simulación por computadora contribuyó grandemente al estudio y análisis de las operaciones a partir de los años 50 del siglo pasado y, desde entonces, se ha expandido su uso principalmente para la toma de decisiones. Uno de los objetivos de la simulación es la de analizar problemas muy complejos para los que no es posible obtener resultados fácilmente. De hecho, la mayoría de los problemas del mundo real encajan en esta categoría. Permite experimentar diferentes posibilidades de políticas y acciones sin tener que cambiar o experimentar realmente con el sistema existente. Para realizar simulaciones por computadora no se requiere una experiencia sofisticada en matemáticas ya que es fácilmente comprensible. Además, comprime grandes períodos de tiempo y permite obtener pronósticos a largo plazo en sólo unos segundos.[24]

[23] http://buscon.rae.es/dpdI/SrvltConsulta?lema=simular
[24] MASSOT Jaime, Análisis de las conclusiones del Estudio de las Alternativas al Canal de Panamá mediante la aplicación de un modelo de simulación de operaciones, 2000, páginas 19-21.

El proceso de creación de un modelo empieza con trazar su diagrama de un modelo, luego se escriben las ecuaciones y se especifican las cantidades numéricas. Después se simula el modelo obteniéndose los resultados preliminares. Por último, los resultados de la simulación pueden ser examinados con instrumentos de análisis para descubrir la conducta de las variables del modelo. La construcción de un modelo sigue unas pautas de crear, probar, y volver a crear, iterando hasta que el modelo cumple los requisitos. La depuración (hasta lograr que un modelo se comporte como deseamos) y el análisis del modelo (investigando su comportamiento) son de utilidad en el proceso de refinarlo.[25]

Como se verá más adelante, uno de los primeros pasos de este trabajo consistió en la elaboración de un diagrama de flujo representativo del manejo del recurso hídrico en la ACP. Para esto, fue necesario familiarizarse con las realidades actuales del sistema operativo del Canal y las diferentes decisiones requeridas para priorizar el uso de las aguas. Como todo sistema, éste quedó dividido en un conjunto de componentes donde los mismos elementos han sido descompuestos en subcomponentes y así sucesivamente. Finalmente, al sistema se le han asignado un conjunto de decisiones que funcionan bajo diferentes algoritmos de operación similares a las utilizadas por la actual administración de EAAR.

La simulación fue escogida, en este trabajo de investigación, como la herramienta más eficaz para evaluar los futuros escenarios de demanda de agua al mismo tiempo que se cumple en un 100% el suministro de agua potable para el consumo humano e industrial, se evitan las restricciones del calado, maximiza la generación hidroeléctrica y minimizan los derrames. A diferencia del programa HEC ResSim (modelo de simulación de embalses sucesor al HEC-5), el modelo está programado mediante instrucciones de Microsoft Excel, por lo tanto, es de fácil comprensión, seguimiento y permite realizarle modificaciones sin conocimientos avanzados de programación. La razón fundamental del uso de este tipo de modelo se basa en su bajo costo y la facilidad de simular diferentes eventos mediante la modificación de posibles escenarios, datos de entrada, restricciones y registros. Adicionalmente, permitió durante su fase de verificación, detectar errores existentes en la base de datos de EAAR.

---

[25] MARTÍN GARCÍA Juan. Guía del usuario de Vensim, 2005.

B. Simulación del funcionamiento de los embalses

Un embalse cumple una función de regulación, esto es, permite almacenar los volúmenes de agua que escurren en exceso para que puedan aprovecharse cuando los escurrimientos son escasos. La ecuación utilizada para la simulación del funcionamiento de los embalses es la de continuidad que, expresada en un intervalo de tiempo Δt, generalmente un mes en embalses grandes, es el volumen de entradas (E) al embalse durante el mes menos el volumen de salidas (S) del embalse durante el mismo mes y da como resultado el cambio de volumen almacenado ΔV en el embalse: $E - S = \Delta V$.[26] Aun cuando la ecuación de continuidad que rige el funcionamiento de un embalse es única, el procedimiento para resolverla difiere según se trate de la contabilidad del funcionamiento de un embalse en servicio (como es actualmente) o simular el comportamiento que un proyecto puede tener en el futuro (Canal ampliado).

Históricamente se han sugerido numerosos métodos para determinar la capacidad de almacenamiento de un embalse necesario para suplir una demanda dada. Todos estos métodos se basan en la ecuación de almacenamiento. Para un embalse único el análisis del pico secuencial o algoritmo del pico secuente es simple y conveniente. Inicialmente se calcula el valor de la suma acumulada de caudales menos la demanda. Enseguida se identifican el primer volumen pico (máximo local del flujo neto acumulado) y el pico siguiente (próximo máximo local que es mayor que el primer pico). El almacenamiento requerido durante ese intervalo es la diferencia entre el pico inicial y el menor valor del intervalo. Este proceso se repite para todo el registro histórico y se escoge el mayor valor calculado del almacenamiento requerido. Para embalses múltiples es necesario un estudio más complejo de la operación o una simulación.[27]

Figura 6 - Aplicación de la ecuación de continuidad en los embalses de Alhajuela y Gatún

	Lago Alhajuela	252.00	Inicial =	28,229	
		242.65	Final =	23,403	
			Cambio =	4,826	MPC
	Entradas (escorrentía neta) =			116,261	
	Salidas (usos, trasvases o demandas) =			(121,087)	
			Cambio =	-4,826	MPC
			BALANCE =	0	

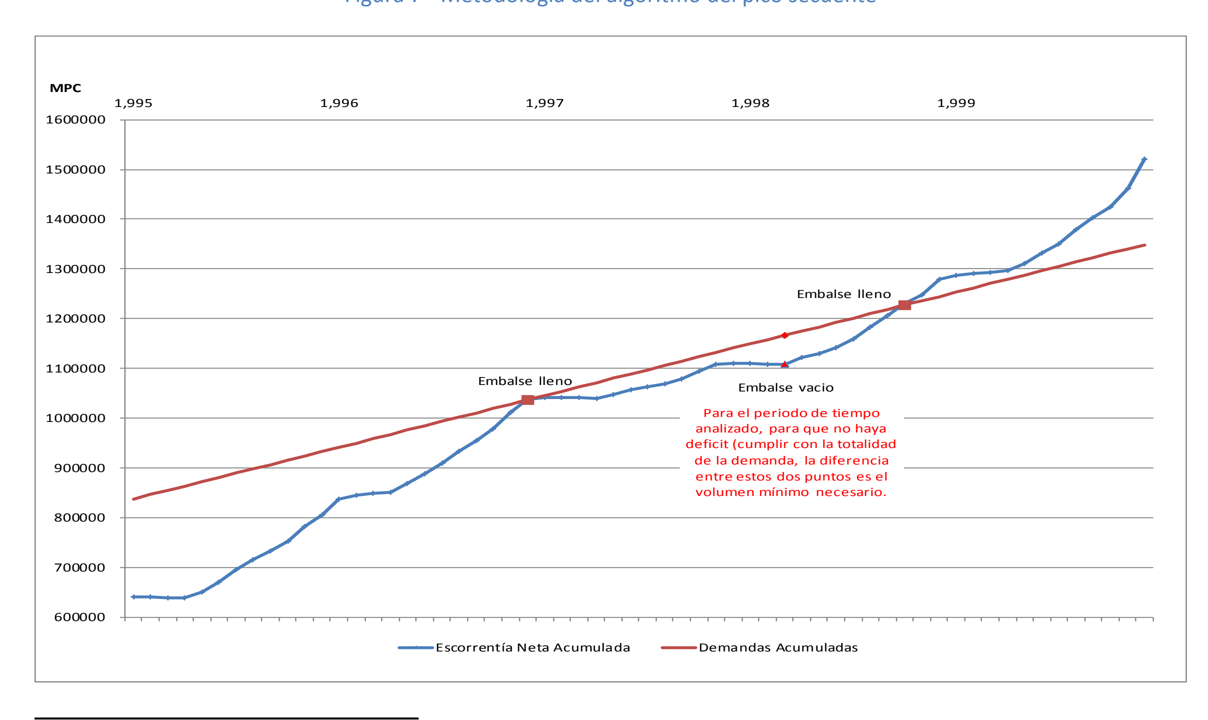
	Lago Gatún	87.50	Inicial =	194,000	
		87.21	Final =	192,683	
			Cambio =	1,317	MPC
	Entradas (escorrentía neta) =			306,242	
	Salidas (usos o demandas) =			(307,559)	
Entradas - Salidas +/- Cambio Alhajuela =				-1,317	MPC
			BALANCE =	0	

[26] Instituto de Investigaciones Eléctricas. Manual de diseño de obras civiles / Simulación del funcionamiento de un vaso, 1980.
[27] LINSLEY, KOHLER Y PAULUS. Hidrología para ingenieros, 1988, páginas 321-322.

En el caso del Canal de Panamá las entradas son, en Alhajuela, las escorrentías netas de la cuenca superior y, en Gatún, el agua proveniente de Alhajuela (generación hidroeléctrica y vertidos) más las escorrentías netas de la cuenca inferior. Las entradas por transferencia de Alhajuela pueden ser libres o controladas. Las salidas en ambos embalses son los vertidos por control de inundaciones, pruebas o mantenimiento; y los volúmenes extraídos para satisfacer las demandas, es decir, agua para consumo humano e industrial y generación hidroeléctrica. Además, en el caso de Gatún, los volúmenes de agua utilizados para los esclusajes.

El modelo de simulación propuesto utiliza la ecuación de continuidad y el algoritmo del pico secuente ya que éste está diseñado para casos en que la demanda no es constante. Para estimar el volumen útil que se requiere para satisfacer una determinada demanda es necesario tener datos de volúmenes escurridos durante un tiempo relativamente largo, en general, un registro de 20 años o más. [28] Debe notarse que las demandas se proyectan hacia el futuro (años 2015, 2020 y 2025) y los volúmenes se calculan con base en la información hidrológica pasada, es decir, escorrentías netas históricas del periodo 1991-2010 (20 años).

Figura 7 - Metodología del algoritmo del pico secuente



---

[28] APARICIO, Fundamentos de Hidrología de Superficie, 1999, página 73.

C. Modelos de simulación de embalses utilizados en el Canal

El modelo de simulación presentado en este estudio no es el primero que utiliza, en periodos de tiempo de un mes, las escorrentías como entradas y las demandas (usos) como salidas. Como muestra se tiene el informe realizado por el personal del Ramo de Meteorología e Hidrografía, de la antigua Compañía del Canal de Panamá, titulado "*Abastecimiento de Agua del Canal de Panamá*" (original en inglés) y publicado, oficialmente, en enero de 1961[29]. Este estudio, realizado luego de la sequía ocurrida en el período 1957-59, demostró la necesidad de investigar los efectos de un período de flujos de agua mínimos en la operación del Canal.

Entre los aspectos de mayor importancia del informe de 1961 se tienen:

- Se simularon los posibles niveles de los embalses de proyectos de mejoras planeados que incrementarían el agua disponible y permitirían diferentes niveles de operación de Gatún (entre un máximo de 87 pies y mínimos de 79 y 82 pies) y Alhajuela (entre un máximo de 250 pies y un mínimo de 200 pies) dependiendo del tráfico proyectado.
- Se emplearon como entradas al sistema las escorrentías de dos años secos consecutivos (1905-06), un período promedio, y dos años lluviosos. Las salidas consistieron en tres escenarios de esclusajes (35, 41, y 52), uso municipal, y evaporación. Los excesos de agua se regularon mediante la generación hidroeléctrica y vertidos en la represa de Gatún.
- La relación de tránsitos y agua utilizada quedo establecida mediante la relación de 1.16 tránsitos por esclusaje. Se simularon los tránsitos y esclusajes diarios para los años 1968, 1980 y 2000. Los pronósticos se hicieron en base al estudio, del 6 de octubre de 1960, de tráfico por el Canal realizado por el Instituto de Investigaciones Stanford.
- Se fijó en 100 pies cúbicos por segundo el agua utilizada para uso municipal, pérdidas, y otros gastos menores. Se pronosticó que esta cifra podría aumentar a 110 pies cúbicos por segundo debido a futuras necesidades de la República de Panamá.

[29] Panama Canal Company. Panama Canal Water Supply, January 1961.

Las conclusiones más importantes fueron:

- El agua disponible durante años promedio es suficiente, luego de la profundización del cauce hasta el nivel de 77 pies, para proveer 66 o más esclusajes (76 tránsitos) diarios si no hay generación hidroeléctrica en la planta de Gatún. Este estimado de tránsitos era superior en 14 esclusajes, para el año 2000, pronosticado por el Instituto de Investigaciones Stanford.
- Los períodos de abastecimiento crítico en el Canal son aquellos que tienen una duración de 12 meses luego de los cinco meses de la temporada seca o sea cuando las reservas de agua están normalmente agotadas. Estos períodos pueden ocurrir un 12% del tiempo. Cuando lo anterior ocurra, el agua para la navegación sólo alcanzará para 41 esclusajes (47 tránsitos) por día (pronóstico para 1980) sin necesidad de establecer restricciones de calado. Esto se lograría mediante la profundización del cauce hasta una altura de 42 pies PLD[30].

Otro estudio de importancia, publicado como parte del Programa de Mejoras para el Canal de Panamá en 196931, utilizó como entrada en el modelo de simulación las escorrentías históricas de 54 años y, como salidas, ocho diferentes escenarios con base en el número de esclusajes por día. Esta cifra varió desde un mínimo de 35 hasta un máximo de 70 esclusajes por día. El nivel del fondo del Corte Gaillard se fijó en 30, 32, 34, 38 y 40 pies (PLD).

La metodología utilizada en el estudio publicado en 1969 consistió en simular como salidas del sistema (únicamente) el posible número de esclusajes. Se emplearon como entradas al sistema las escorrentías netas históricas de los períodos 1918-22, 1929-33, 1939-43, 1945-49, 1957-61, y 1962-66; o sea, los períodos secos con más de un año de duración ocurridos desde la formación del embalse de Gatún en 1914 (hasta la fecha del estudio). Es interesante observar que este estudio define, igual que el estudio anterior, los períodos secos como aquellos de 12 meses de duración, luego de los cinco meses de la temporada seca (enero a mayo) donde no se repleta la capacidad disponible de los reservorios (un total de 17 meses).

---

[30] PLD: Nivel de Referencia del Canal (Precise Level Datum).
[31] Panama Canal Company. Improvement Program for the Panama Canal, Appendix V-Water Supply, 1969.

Para el reporte de 1969, la capacidad máxima disponible de los embalses se determinó empleando como rango de elevaciones de Alhajuela de 200 a 252 pies y Gatún de 82 a 87 pies. Además, establece la capacidad combinada de ambos reservorios en 43,124 MPC o sea, aproximadamente, el 20% de la escorrentía media anual. Esta capacidad era, según el estudio, suficiente para mantener un promedio de 40 esclusajes diarios o, en otros términos, 16,100 tránsitos al año. La relación de tránsitos y uso del agua se fijó en 1.1 tránsitos por cada esclusaje. El estudio concluye que sólo un pequeño porcentaje del agua existente es aprovechada y que, aceptando posibles restricciones de calado (uno cada 10 años), las facilidades existentes podrían mantener de 40 a 45 esclusajes al día (16,100 a 18,700 tránsitos al año) con niveles mínimos de 82 a 83 pies (lago Gatún) y calados permitidos en los buques entre 35 a 36 pies.

En 1993 se publica el estudio "*Conclusiones del Estudio de Alternativas al Canal de Panamá*". Éste se inició en 1985 con la formación de la Comisión para el Estudio de las Alternativas al Canal de Panamá (CAS por sus siglas en inglés) y fue patrocinado por los gobiernos de Panamá, Japón y los Estados Unidos. El grupo tripartita contrató compañías consultoras internacionales para la ejecución de los estudios basándose, fundamentalmente, en información existente en la Comisión del Canal de Panamá. La responsabilidad de esta comisión internacional era la de determinar qué alternativas o mejoras eran necesarias realizar al Canal para cumplir con las demandas del tráfico mundial del siglo XXI. El costo del estudio realizado por esta Comisión fue de 20 millones de balboas, aproximadamente, el cual fue compartido por los tres países.

En el reporte final de CAS se concluye que la alternativa más viable es la construcción de un nuevo juego de esclusas, con una capacidad para buques de 150,000 toneladas de peso, que empezará a operar, en conjunto con facilidades actuales, en el año 2020. Desde el punto de vista de disponibilidad de recursos hídricos, se determinó que con el volumen de tráfico esperado y la operación del nuevo juego de esclusas en conjunto con las actuales, no sería necesario tomar medida especial alguna debido a que el volumen de agua requerido podría ser suplido por la cuenca y estructuras (represas) existentes.

El informe además señala que no va a ser sino hasta el año 2060 que los recursos hídricos existentes serán insuficientes para abastecer las necesidades de agua debido al tráfico futuro de buques. Por lo tanto, se requerirá, a partir del año 2060, una represa reguladora en el río Ciri Grande y desviar las aguas represadas por una nueva fuente ubicada fuera de los límites existentes de la CHCP, es decir, el río Indio. En casos especiales, por ejemplo en años extremadamente secos, las necesidades hídricas pudiesen ser suplidas mediante el reciclaje de agua por medio de estaciones de bombeo.

Las conclusiones sobre las necesidades hídricas del estudio anterior fueron desechadas por la Comisión del Canal de Panamá mediante carta enviada por el Administrador a los organizadores del Congreso Universal del Canal en 1997. El análisis anterior fue la base de la tesis de maestría titulada "*Análisis de las conclusiones del Estudio de las Alternativas al Canal de Panamá mediante la aplicación de un modelo de simulación de operaciones*".

Las conclusiones y recomendaciones de esta investigación[32] fueron las siguientes:

1. Las necesidades hídricas no pueden ser analizadas mediante la simulación de un período de solamente un año. Por regla general, los efectos de un período seco se dan tanto en el año en curso como el siguiente (ejemplos 1976-1977, 1982-1983 y 1997-1998). De no alcanzarse la máxima capacidad operacional en los embalses a finales de año y con las nuevas demandas provenientes del aumento de tránsito por el Canal, es casi seguro que el siguiente año se tenga que ejecutar restricciones de calado.
2. Los límites y reglas operacionales de los embalses, tanto los mínimos como los máximos, utilizados en el estudio de CAS no eran similares a los empleados en la realidad. Esto repercutió en los resultados de las simulaciones al aplicarse reglas de operación obsoletas.
3. Durante la mayoría del tiempo (9 de cada 10 años), el agua almacenada en los lagos es suficiente para cubrir las demandas a corto plazo de la población y el Canal. No obstante, se debe considerar la construcción de estructuras que permitan el manejo del recurso hídrico debido a la falta de capacidad de almacenamiento en la cuenca tradicional. Esto evitará el

[32] MASSOT Jaime, El Recurso Hídrico como elemento esencial ante la posibilidad de un futuro Tercer Juego de Esclusas, 6 de noviembre de 2000.

vertido de recursos hídricos al mar durante los últimos meses del año que coinciden cuando los embalses alcanzan su máxima capacidad.

4. Los conceptos sobre simulación y regulación de vasos de almacenamiento (embalses) son descritos en cursos básicos de hidrología dictado desde el tercer año de la licenciatura en ingeniería civil. El estudio y reporte, sobre los recursos hídricos publicados por CAS, fue realizado por la firma consultora Yachiyo Engineering Company Limited, sin embargo, no había un sólo hidrólogo en este equipo. Se recomienda que, en todo estudio o modelo de simulación propuesto, se incluya el personal idóneo en los temas a tratar.
5. El modelo utilizado por CAS presenta una inexactitud en los valores de los registros, específicamente, de las escorrentías netas. Éstas no corresponden a los registros históricos almacenados en el banco de datos de la ACP y, por lo general, presentan valores superiores a los que se dieron en la realidad.
6. El estudio de CAS debió simular períodos de 18 meses, como mínimo, o 24 meses; como se hizo en este trabajo. La utilización de sólo 12 meses invalida todas las conclusiones obtenidas con respecto al plan de manejo de aguas y las capacidades de reserva hídrica requeridas. Toda investigación que se realice para evaluar las necesidades hídricas del Canal de Panamá deberá emplear, como mínimo, los registros históricos de los 12 meses más secos a partir de los primeros cinco o seis meses del año a simular.
7. Independientemente de la construcción de un futuro tercer juego de esclusas, los recursos hídricos disponibles en la cuenca tradicional del Canal no son suficientes para satisfacer la demanda creciente de agua potable de la población en caso de presentarse un período extremadamente seco. Se recomienda que los futuros estudios incluyan las demandas de agua debido al crecimiento poblacional en conjunto con los recursos hídricos requeridos para el paso de los buques (esclusajes).
8. Las conclusiones del estudio de CAS, con respecto al abastecimiento de agua requerida para los años 2020 y 2060, son erróneas. Aún con la actualización de los resultados del estudio, luego del Congreso Universal del Canal de Panamá, no deja de ser un hecho que cada vez que ocurra un año extremadamente seco (como ya ocurrió en 1997-1998) se tendrá que restringir el calado de los buques; ya sea en el año en curso o el siguiente.[33]

[33] MASSOT Jaime, Análisis de las conclusiones del Estudio de las Alternativas al Canal de Panamá mediante la aplicación de un modelo de simulación de operaciones, 2000, páginas 71-72.

Desde 1999 hasta la aprobación del referéndum de ampliación del Canal de Panamá, el 22 de octubre de 2006, se publicaron otros estudios relacionados a la administración y uso eficiente de los recursos hídricos del Canal. Aunque estas investigaciones utilizaron metodologías y programas mucho más avanzados, que el modelo presentado en este informe, todos utilizan la misma fuente de información ("*Blue Books*"). Entre los estudios más relevantes tenemos:

1. VILAR, Manuel. Rule Curve Study. Panama Canal Commission, 1999.
2. United States Army Corps of Engineers. Panama Canal Reconnaissance Study / Identification, Definition and Evaluation of Water Supply Projects, 1999.
3. Harza Engineering Company. Long-Term Forecast for Municipal and Industrial Water Demand and Raw Water Consumption, 2001.
4. ECHEVERS, Modesto. Análisis de las estrategias de operación de los lagos Gatún y Alhajuela. Autoridad del Canal de Panamá, 2003.
5. Autoridad del Canal de Panamá. Propuesta de Ampliación del Canal de Panamá / Administración del recurso hídrico. Junio de 2006.

Figura 8 - Estudios sobre la administración de los recursos hídricos (1999-2006)

Rule Curve Study (Manuel Vilar) - 1999	Página 1: «El estudio consistió en dos enfoques distintivos en la simulación de operaciones de los lagos con los datos diarios desde 1965 hasta 1994.»
Panama Canal Reconnaissance Study / Identification, Definition and Evaluation of Water Supply Projects - 1999	Página 2: «Las investigaciones incluyen, revisiones de literatura, una recopilación de datos existentes, el desarrollo de datos para los sitios del proyecto, visitas de campo y la aplicación de modelos de simulación para determinar el rendimiento de agua para los proyectos propuestos. Los datos hidrológicos se obtuvieron de los registros existentes y se aplicaron las técnicas para generar períodos equivalentes de registro.»
Pronóstico a largo plazo de la demanda de agua municipal e industrial y consumo de agua cruda (Montgomery Watson) Harza - 2001	Página 8-22: «Las estimaciones de futuras fuentes y requisitos de las instalaciones se puede obtener sobre la base de una revisión de los últimos registros de operaciones. Esta revisión permite establecer una línea base para la situación actual y ayudar a determinar las tendencias en la región.»
Análisis de las estrategias de operación de los lagos Gatún y Alhajuela (Modesto Echevers) - 2003	Página 3: «Los datos de agua utilizada para esclusajes y para uso municipal e industrial que se utilizaron en la simulación fueron los usos reales ocurridos durante el periodo analizado.»
Propuesta de Ampliación del Canal de Panamá / Proyecto del Tercer Juego de Esclusas / Administración del Recurso Hídrico (ACP) - 2006	Todos los datos utilizados en el capítulo 7, administración de los recursos hídricos, están basados en los registros históricos (agua utilizada para consumo humano e industrial, generación hidroeléctrica, derrames, etc.) principalmente el periodo de 1994 al 2003.

III. Metodología

A. Planteamiento del problema y objetivo del modelo

Con base en lo mencionado en el capítulo anterior, los embalses cumplen con la función de regular los escurrimientos de los ríos y tributarios para almacenar el agua que escurre en exceso en las temporadas de lluvia para posteriormente usarlos en las épocas de sequía, cuando los escurrimientos son escasos. La CHCP almacena agua principalmente en los embalses de Gatún y Alhajuela.

El embalse de Gatún tiene un doble propósito: almacena agua y es cauce de navegación de los buques entre las esclusas del Atlántico y el Pacífico. El embalse de Alhajuela actúa como un embalse secundario para regular el nivel del lago Gatún y controlar las crecidas del río Chagres. Al mismo tiempo, sirve como fuente de suministro de agua para la ciudad de Panamá a través de la planta potabilizadora de Chilibre.

Como el embalse de Gatún es usado para la navegación del Canal, la cantidad de agua que puede almacenar y utilizar es determinada por la profundidad mínima que debe mantener para proporcionar el calado necesario a los buques. La cantidad de agua que puede almacenar también está sujeta a la elevación máxima a la que puede llegar sin causar desbordamientos en la represa de Gatún o en las esclusas de Gatún y Pedro Miguel. Esto permite que en la actualidad el embalse de Gatún opere a elevaciones que oscilan entre 81.5 y 87.5 pies. Como el embalse de Alhajuela no es utilizado para la navegación de los buques, su volumen utilizable está definido por la elevación mínima de diseño para la operación de la toma de agua de la planta potabilizadora de Chilibre, y la elevación máxima de la represa Madden, lo cual le permite operar a elevaciones que oscilan entre 190 y 252 pies (en realidad el nivel máximo de operación es 251.90 pies pero se utiliza la cifra de 252 pies por efectos prácticos).

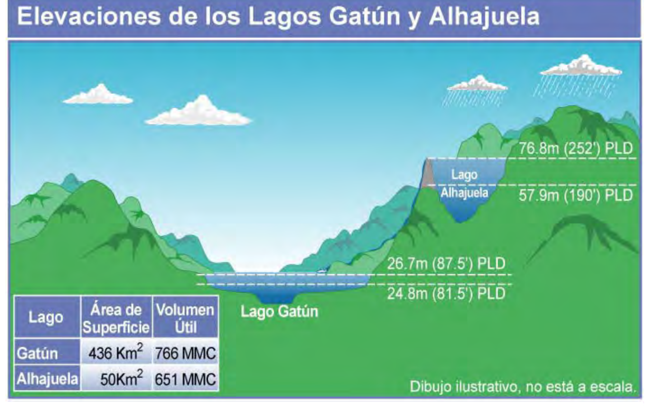


Figura 9 - Elevaciones de los lagos Gatún y Alhajuela

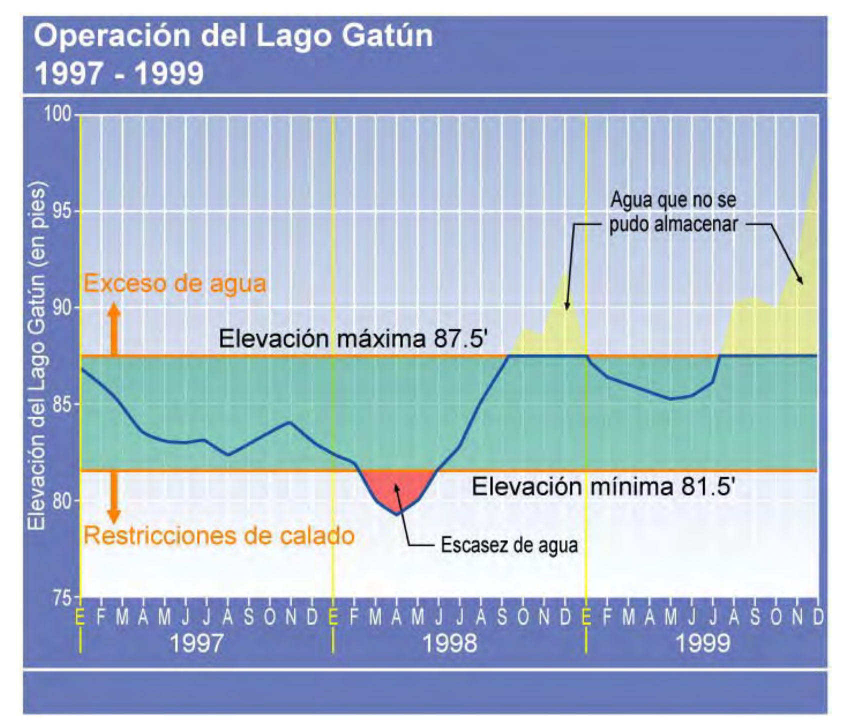


Figura 10 - Fenómeno de El Niño (Administración del recurso hídrico / figura 7-15)

"En la estación lluviosa, con aproximadamente ocho meses de duración anual, la CHCP recibe abundante precipitación de agua. A la inversa, durante los cuatro meses de la estación seca (de enero a abril), la precipitación se reduce significativamente. Si no hubiera una disponibilidad adecuada de agua, sea por una baja precipitación o por un alto consumo, el nivel del embalse de Gatún pudiese bajar más allá del nivel mínimo requerido para la operación normal del Canal. Esta situación obligaría a una reducción en el calado máximo permitido a los buques que transitan por el Canal y, en consecuencia, limitaría considerablemente la capacidad de carga de los mismos. De hecho, el Canal se ha visto obligado a imponer restricciones al calado de los buques en períodos severos de sequía, tal como sucedió durante el Fenómeno de El Niño de 1997-1998. Para evitar restringir el calado de los buques, el Canal utiliza los embalses de Gatún y Alhajuela para almacenar y administrar de manera eficiente el agua proveniente de la CHCP a fin de abastecer las necesidades de todo el año, especialmente durante la estación seca." [34]

Por lo anterior y utilizando como referencia bibliográfica la propuesta de ampliación del Canal, el modelo ha sido diseñado para administrar los aportes que llegan a los embalses de forma que se satisfagan las demandas de acuerdo a las siguientes prioridades: (1) Satisfacer las necesidades de consumo humano e industrial. (2) Subir y bajar los buques en las esclusas durante las operaciones de esclusaje. (3) Permitir la navegación de buques en los lagos Gatún y Miraflores. (4) Generación hidroeléctrica.

[34] Autoridad del Canal de Panamá. Administración del recurso hídrico, páginas 3-4.

Para la administración del recurso hídrico de la CHCP: "*Las necesidades de agua de la población tienen la mayor prioridad, por lo que la administración del recurso hídrico siempre asegura la disponibilidad del agua para este propósito. El funcionamiento del Canal, que incluye agua para las operaciones de esclusaje y para la navegación, representa el segundo uso en importancia. La generación hidroeléctrica representa el uso menos rentable del agua, pero es un mecanismo para aprovechar el agua que, de otra forma, habría que verter al mar sin sacarle provecho.*"[35]

El crecimiento de la población en las regiones cercanas a la CHCP y la creciente demanda de tránsito de buques, sea a través de las esclusas existentes o tras la posible construcción de un tercer juego de esclusas, ocasionarán una mayor necesidad de agua en el futuro. Por esta razón resulta imprescindible que se administre el recurso hídrico de forma eficiente y que se pronostiquen las necesidades de expansión de la capacidad hídrica de la CHCP, por tratarse de un elemento crítico para asegurar tanto el abastecimiento de agua para la población como el funcionamiento confiable del Canal a largo plazo. [36]

Con el fin de cumplir los objetivos anteriores, EAAR realiza actividades de pronóstico y control de niveles de los lagos; operación del sistema de prevención de inundaciones; y opera la red de estaciones hidrometeorológicas para la recolección, almacenamiento y análisis de los registros hidrográficos y meteorológicos. Maneja también un plan de contingencia en caso de derrames. Es deseable que, en condiciones normales, la estación seca se inicie con ambos lagos llenos, después de haber mantenido una capacidad adecuada de almacenamiento para caso de inundaciones durante la estación lluviosa. Lo anterior se logra combinando la generación hidroeléctrica con los aportes, demandas y pérdidas.[37]

B. Identificación de los componentes del modelo de simulación

---

[35] Ibid., página 5.
[36] Ibíd., páginas 6.
[37] MASSOT Jaime, Análisis de las conclusiones del Estudio de las Alternativas al Canal de Panamá mediante la aplicación de un modelo de simulación de operaciones, año 2000, páginas 37-38.

La esencia de la ciencia de modelar es la reducción y simplificación de un sistema complejo. Lo que se ha propuesto en este trabajo es el de identificar los elementos y procesos esenciales del sistema de administración de los recursos hídricos a nivel mensual, en la CHCP, que sean suficientes para simular y dar respuesta a los objetivos mencionados en el primer capítulo. A continuación se presentan los componentes considerados en el modelo.

- Salida o propósito del modelo de simulación

El propósito del modelo es que sea una representación simplificada del sistema real en el cual se han eliminado los detalles irrelevantes y que lo complican innecesariamente. A diferencia del sistema de administración actual, con curvas guías claramente definidas, en éste se han adoptado nuevos algoritmos de operación con la finalidad de optimizar la generación hidroeléctrica, en ambos embalses, luego de suplir totalmente la demanda de agua para el consumo humano e industrial. Al mismo tiempo, es prioritario garantizar que no se den restricciones de calado y evitar al máximo cualquier derrame de agua por los vertederos. También se ha programado para que, al finalizar la temporada lluviosa, los embalses alcancen los niveles máximos operativos (Alhajuela 252 pies y Gatún 87.5 pies)[38] tanto en la etapa de verificación y validación del modelo como en la simulación de los escenarios del Canal ampliado (Alhajuela 252 pies y Gatún 89 pies) para los años 2015, 2020 y 2025.

- Entradas o valores requeridos para ejecutar las simulaciones

Las entradas incluyen las condiciones iniciales del sistema, los datos determinísticos, los aportes al sistema y las demandas. Estas condiciones diferirán de acuerdo a la etapa del proyecto que estemos implementando.

a) Condiciones iniciales y restricciones del sistema: se podrán seleccionar estos valores de acuerdo al tipo de análisis que requiera. Las cifras que a continuación se presentan representan el sistema actual de manejo de los embalses de Gatún y Alhajuela.

---

[38] De acuerdo al "*Plan de Control de Inundaciones para el Canal de Panamá*", del 15 de agosto de 2012, "*el nivel máximo operacional del embalse Alhajuela será de 254 pies*". Esta elevación difiere de las publicaciones de la sección y, por lo tanto, requiere revisión.

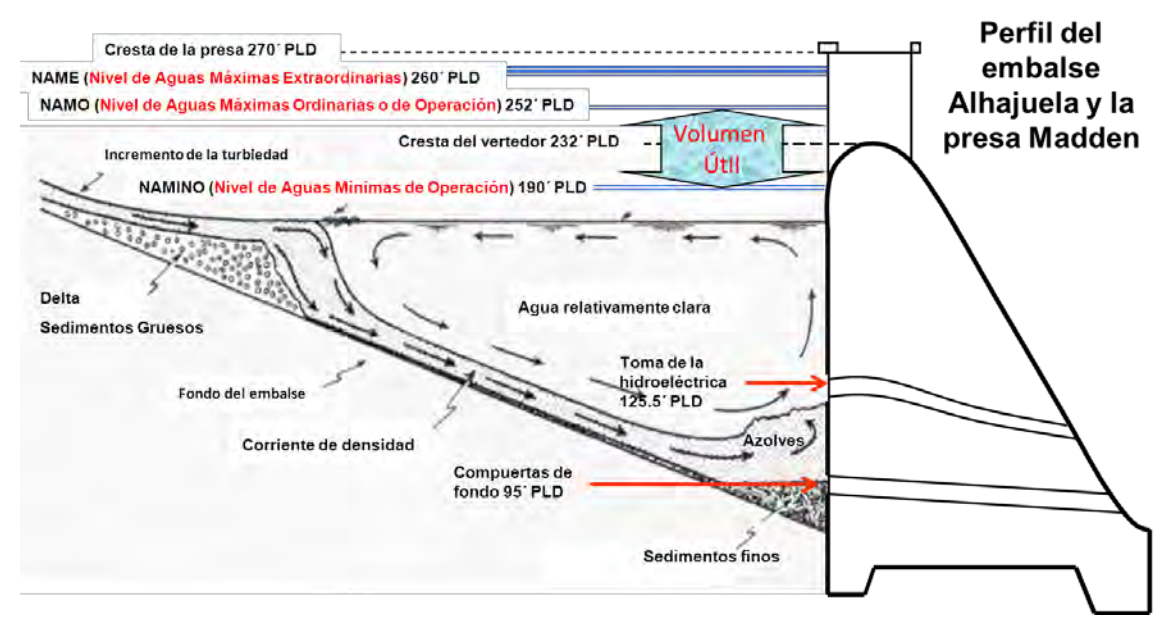


Figura 11 - Principales componentes del embalse de Alhajuela

- Elevaciones iniciales: por regla general se prefiere comenzar las simulaciones con los embalses a su máxima capacidad operativa, sin embargo, para la etapa de verificación y validación se escogieron los niveles iniciales de los embalses similares al periodo de 1991-1992, es decir, el embalse de Gatún con 87.37 pies y Alhajuela 250.31 pies (1 de enero de 1991 a las 0001 horas).
- Nivel de Aguas Mínimo de Operación (NAMINO): es el nivel más bajo con que se pueden operar los embalses. Actualmente es de 81.5 pies en Gatún y 190 pies en Alhajuela pero para el Canal ampliado dependerá del calado máximo que se desee brindar y el grado de confiabilidad que se pueda garantizar.
- Nivel de Aguas Extraordinarias (NAME): es el nivel más alto que debe alcanzar el agua en los embalses bajo cualquier condición. De acuerdo al memorando titulado "*Plan de Control de Inundaciones para el Canal de Panamá*", del 15 de agosto de 2012, estos niveles máximos para el "*Almacenamiento de emergencia para Control de Inundaciones*" son de 92 y 263 pies para los embalses de Gatún y Alhajuela respectivamente.[39]

[39] Los niveles máximos registrados en el Canal fueron el 8 de diciembre de 2010, cuando Gatún llegó a la elevación de 88.57 pies y, en Alhajuela, el 20 de diciembre de 1983, cuando el nivel del lago alcanzó los 257.87 pies.

- Nivel de Aguas Máximo de Operación (NAMO): es el máximo nivel con que se puede operar los embalses para satisfacer las demandas, es decir, en la actualidad, 87.5 y 252 pies para los embalses de Gatún y Alhajuela.
- El volumen que queda entre NAME y NAMO, llamado superalmacenamiento, sirve para controlar las crecidas extraordinarias.
- La operación de la presa se lleva a cabo entre el NAMINO y el NAMO.
- El volumen que se almacena entre el NAMO y el NAMINO se llama capacidad útil y es con el que se satisfacen las demandas de agua.
- El volumen muerto es el que queda debajo de NAMIN y es un volumen que no se puede disponer.
- El nivel de azolves o sedimentos está abajo del nivel de la toma y se reserva para recibir el acarreo de sólidos durante la vida útil de la presa.
- El espacio que queda entre el NAME y la elevación de la cresta de la represa se denomina borde libre y está destinado a contener el oleaje producido por el viento.[40]

d) Los aportes al sistema: estos corresponden a las escorrentías netas mensuales históricas de los embalses de Alhajuela y Gatún. Por instrucciones de la gerencia de EAAR se utilizarán los registros históricos del periodo 1991 a 2010.

e) Agua utilizada por esclusaje: esta relación varía periódicamente y presenta valores mínimos cuando el embalse de Gatún se encuentra en sus niveles más bajos y viceversa. De acuerdo a la Propuesta de Ampliación del Canal: "*Las esclusas [actuales] utilizan aproximadamente 0.21 millones de metros cúbicos (55 millones de galones) de agua dulce*" por esclusaje.[41] Esto equivale a 7.35 MPC.

f) Demandas o salidas del sistema: estos valores inciertos pero necesarios para la modelación incluyen las demandas por consumo humano e industrial y número de esclusajes. Estos valores pueden ser históricos (para analizar, verificar, validar y optimizar el modelo) o futuros para determinar si los recursos hídricos serán suficientes para satisfacer las demandas pronosticadas para los años 2015, 2020 y 2025.

[40] APARICIO, Fundamentos de Hidrología de Superficie, 1999, página 73.
[41] Autoridad del Canal de Panamá. Administración del recurso hídrico, página 9.

C. Elaboración del diagrama de flujo del modelo

Los diagramas de flujo son una manera de representar visualmente el flujo de datos a través de sistemas de tratamiento de información. Los diagramas de flujo describen que operaciones y en que secuencia se requieren para solucionar un problema dado. Un diagrama de flujo u organigrama es una representación diagramática que ilustra la secuencia de las operaciones que se realizarán para conseguir la solución de un problema.

Los diagramas de flujo se dibujan generalmente antes de comenzar a programar el código frente a la computadora. Estos diagramas de flujo desempeñan un papel vital en la programación de un problema y facilitan la comprensión de problemas complicados y sobre todo muy largos. Una vez que se dibuja el diagrama de flujo, llega a ser fácil escribir el programa en cualquier idioma de alto nivel. A menudo se ve la ventaja de los diagramas de flujo al momento de explicar el programa a otros. Por lo tanto, es correcto decir que un diagrama de flujo es una necesidad para la adecuada documentación de un programa complejo.[42]

Para facilitar la programación de los procesos, identificar claramente sus componentes y diferenciar las variables utilizadas se ha dibujado el diagrama de flujo del modelo propuesto. A este se le han añadido las ecuaciones y resultados obtenidos (resaltados en amarillo en el diagrama de flujo) en esta primera interacción utilizando como aportes las escorrentías netas mensuales, niveles iniciales históricos y demandas de los embalses de Alhajuela y Gatún de enero de 1991 (inicio de la simulación de prueba).

Se puede observar, en el diagrama de flujo mostrado más adelante, que el modelo propuesto tiene las siguientes características, o sea, que es:

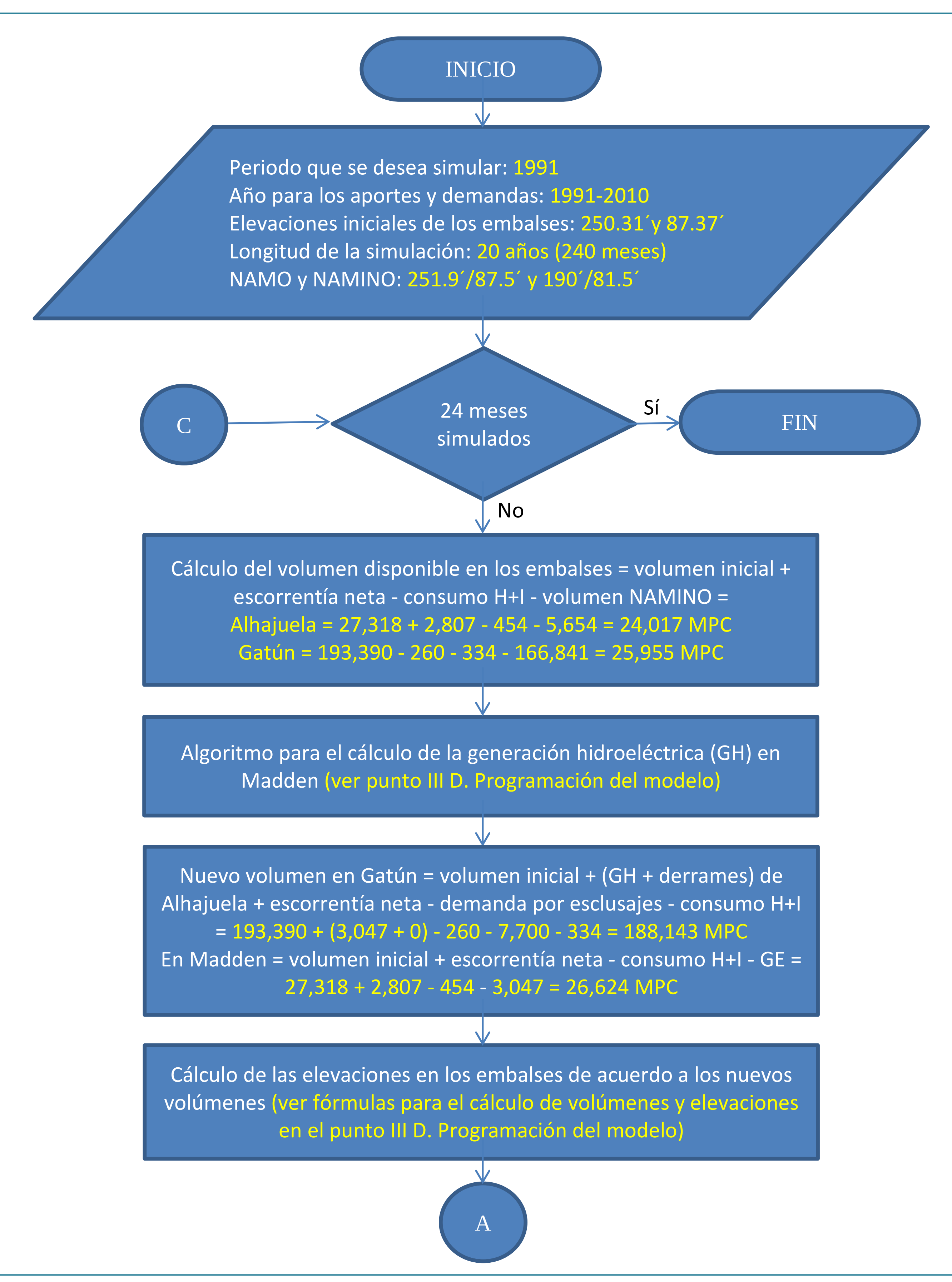
1. Dinámico: el estado del sistema que representa varía con el tiempo, mensualmente, durante 12, 24 o más hasta un máximo de 240 meses. Se puede modificar para periodos menores de tiempo (semanas o días) pero, como se mencionó anteriormente, esto eliminaría su simplicidad y fácil comprensión aunque aumentaría su precisión y semejanza con la realidad.

[42] http://mis-algoritmos.com/aprenda-a-crear-diagramas-de-flujo

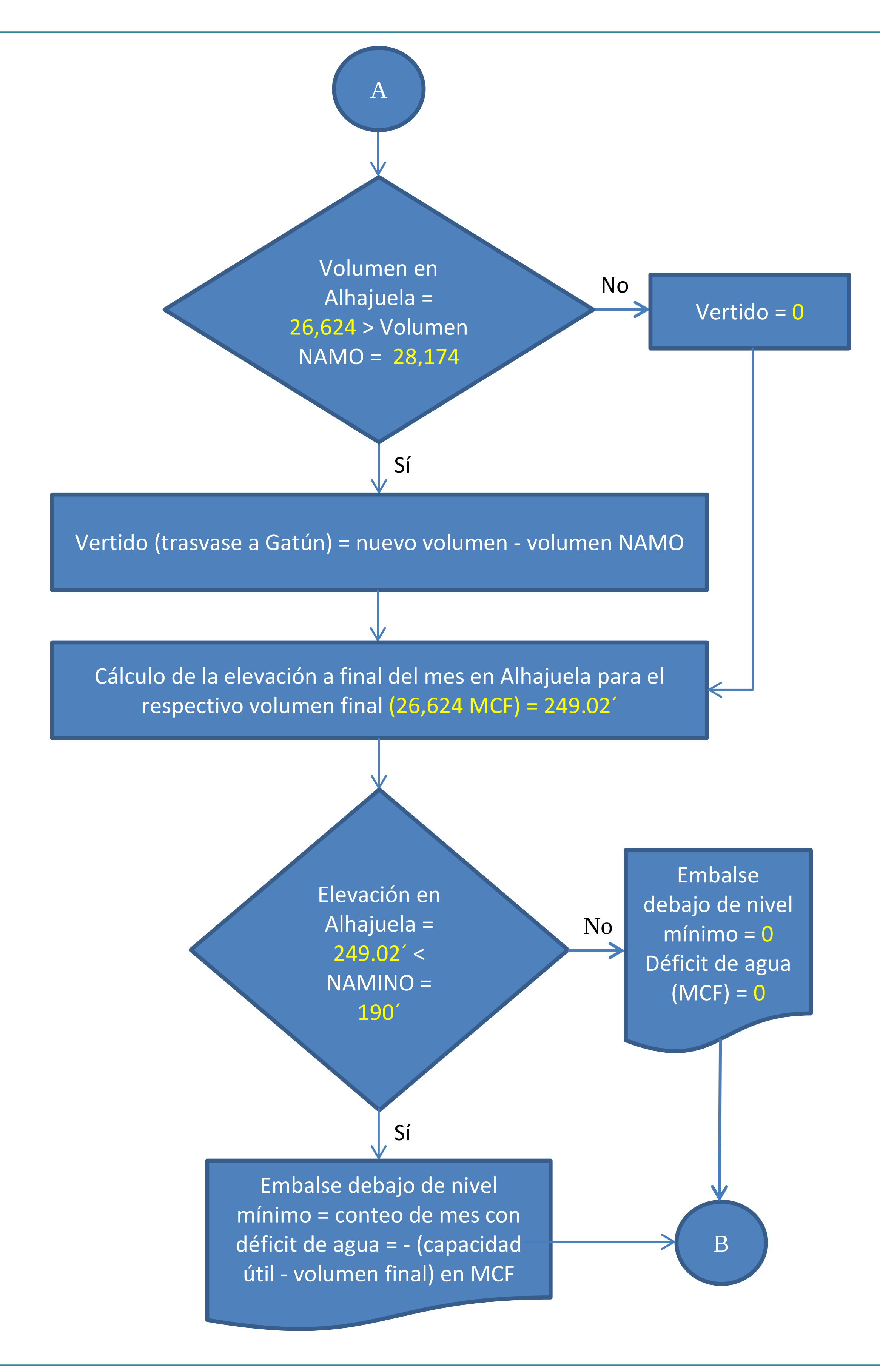
2. Matemático: es producto de una abstracción de un sistema real, eliminando las complejidades y haciendo suposiciones pertinentes. Se aplica una técnica matemática y se obtiene una representación simbólica del mismo. Incluye variables de decisión, restricciones y función objetivo.
3. Analítico: la realidad se representa por fórmulas matemáticas.
4. Continuo: representa un sistema cuyos cambios de estado son graduales (mes a mes). Las variables intervinientes son continuas.
5. Determinístico: las mismas entradas producirán invariablemente las mismas salidas, no contemplándose la existencia del azar ni el principio de incertidumbre. Está estrechamente relacionado con la creación de entornos simulados a través de simuladores para el estudio de situaciones hipotéticas, o para crear sistemas de gestión que permitan disminuir la incertidumbre. La inclusión de mayor complejidad en las relaciones con una cantidad mayor de variables y elementos ajenos al modelo determinístico hará posible que éste se aproxime a un modelo probabilístico o de enfoque estocástico.[43]

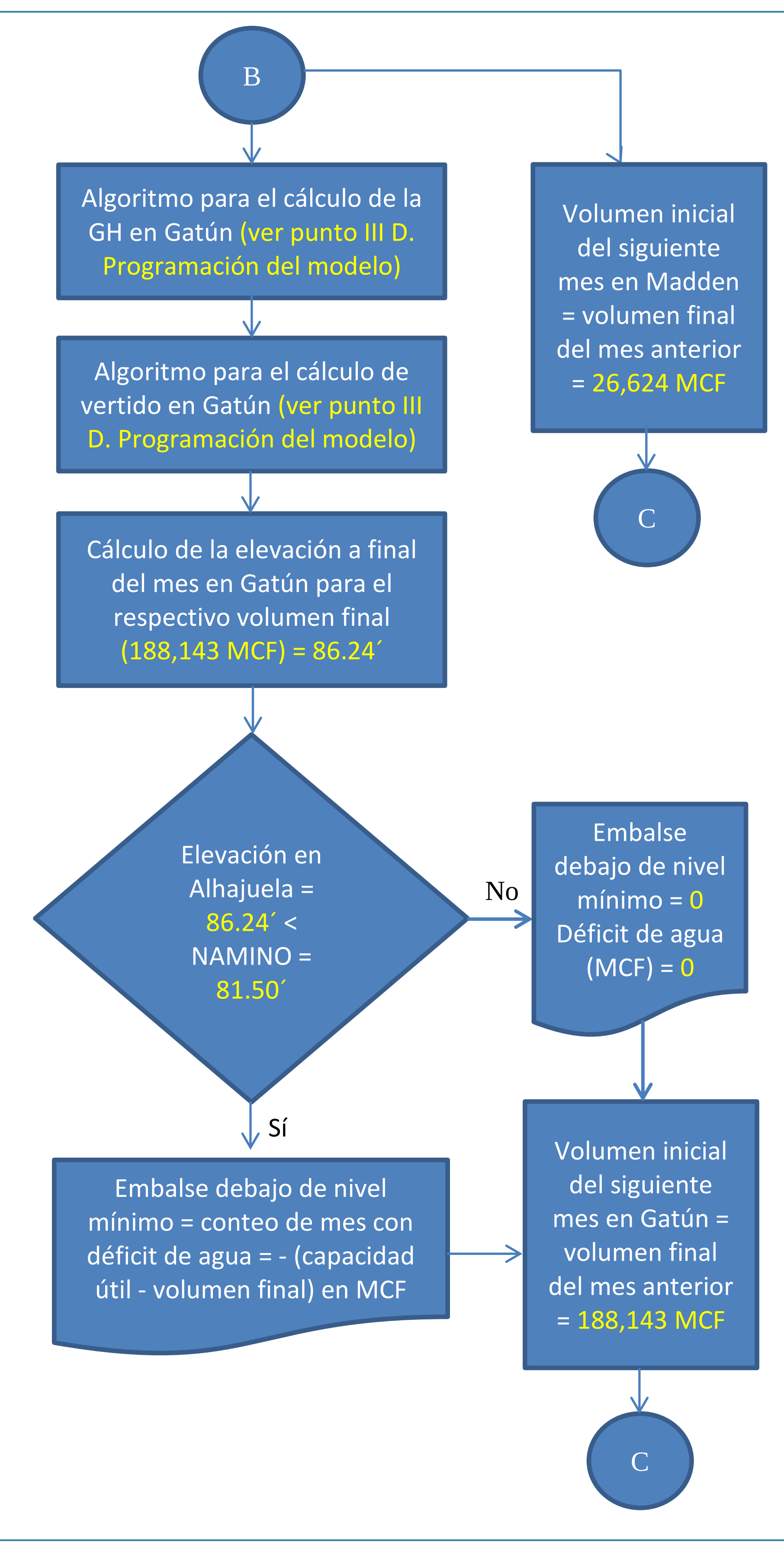
A continuación se muestra una pequeña sección de los resultados de las ecuaciones y reglas del diagrama de flujo que se presenta en las siguientes páginas.

[43] Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires. Sistemas, Modelos y Simulación / Clasificación de los modelos, páginas 7-8.



INICIO
Periodo que se desea simular: 1991
Año para los aportes y demandas: 1991-2010
Elevaciones iniciales de los embalses: 250.31´y 87.37´
Longitud de la simulación: 20 años (240 meses)
NAMO y NAMINO: 251.9´/87.5´ y 190´/81.5´
C
24 meses simulados
Sí
FIN
No
Cálculo del volumen disponible en los embalses = volumen inicial + escorrentía neta - consumo H+I - volumen NAMINO =
Alhajuela = 27,318 + 2,807 - 454 - 5,654 = 24,017 MPC
Gatún = 193,390 - 260 - 334 - 166,841 = 25,955 MPC
Algoritmo para el cálculo de la generación hidroeléctrica (GH) en Madden (ver punto III D. Programación del modelo)
Nuevo volumen en Gatún = volumen inicial + (GH + derrames) de Alhajuela + escorrentía neta - demanda por esclusajes - consumo H+I = 193,390 + (3,047 + 0) - 260 - 7,700 - 334 = 188,143 MPC
En Madden = volumen inicial + escorrentía neta - consumo H+I - GE = 27,318 + 2,807 - 454 - 3,047 = 26,624 MPC
Cálculo de las elevaciones en los embalses de acuerdo a los nuevos volúmenes (ver fórmulas para el cálculo de volúmenes y elevaciones en el punto III D. Programación del modelo)
A


A
Volumen en Alhajuela = 26,624 > Volumen NAMO = 28,174
No
Vertido = 0
Sí
Vertido (trasvase a Gatún) = nuevo volumen - volumen NAMO
Cálculo de la elevación a final del mes en Alhajuela para el respectivo volumen final (26,624 MCF) = 249.02´
Elevación en Alhajuela = 249.02´ < NAMINO = 190´
No
Embalse debajo de nivel mínimo = 0
Déficit de agua (MCF) = 0
Sí
Embalse debajo de nivel mínimo = conteo de mes con déficit de agua = - (capacidad útil - volumen final) en MCF
B


B
Algoritmo para el cálculo de la GH en Gatún (ver punto III D. Programación del modelo)
Algoritmo para el cálculo de vertido en Gatún (ver punto III D. Programación del modelo)
Cálculo de la elevación a final del mes en Gatún para el respectivo volumen final (188,143 MCF) = 86.24´
Elevación en Alhajuela = 86.24´ < NAMINO = 81.50´
No
Sí
Embalse debajo de nivel mínimo = conteo de mes con déficit de agua = - (capacidad útil - volumen final) en MCF
Embalse debajo de nivel mínimo = 0
Déficit de agua (MCF) = 0
Volumen inicial del siguiente mes en Gatún = volumen final del mes anterior = 188,143 MCF
C
Volumen inicial del siguiente mes en Madden = volumen final del mes anterior = 26,624 MCF
C

D. Programación del modelo

El modelo fue programado mediante instrucciones en hojas de cálculo del programa Excel en la versión 14 de Microsoft Office Profesional Plus 2010. En el cuarto capítulo se pueden observar las pantallas, resultados, tablas y gráficas generadas. Todas las reglas de operación, límites y restricciones operacionales, condiciones iniciales y decisiones lógicas están programadas en base a fórmulas, tablas, controles, etc. contenidas en diferentes hojas del programa Excel.

Se ha empleado, como referencia inicial para la toma de decisiones, las actuales reglas de operación de los embalses. Las curvas guías, como comúnmente se les conoce, son los niveles mínimos deseables graficados a través del año. Sirven como pautas para la administración eficiente de los recursos hídricos para las demandas prioritarias como lo son el consumo humano e industrial, esclusajes y generación hidroeléctrica teniendo en cuenta, como base, el calado mínimo requerido para el tránsito de los buques. Las curvas actuales fueron puestas en operación por primera vez en 1980 y su diseño se basó en los datos y reglas de operación existentes hasta 1979. Las curvas fueron diseñadas, hace más de 30 años, para mantener el nivel del embalse de Gatún a un nivel superior de 84.7 pies, nueve de cada diez años (90% del tiempo), mientras se maximizaba la producción de energía hidroeléctrica.

Aunque las simulaciones realizadas demuestran que las curvas guías aún mantienen su validez, se debe tomar en cuenta lo siguiente para las operaciones del Canal ampliado:

1. Las restricciones de calado por el cauce del Canal, antes de 1984 (fecha en que finalizaron los trabajos de profundización del fondo del cauce de navegación de 40 a 37 pies PLD), se iniciaban cuando el nivel del embalse de Gatún descendía debajo de 84.5 pies. En la actualidad, este nivel corresponde a 81.5 pies. Estos tres pies de diferencia equivalen, aproximadamente, a unos 13,350 MPC. Este volumen corresponde al agua utilizada en unos 1,800 esclusajes (55 millones de galones cada uno) o el agua extraída de los embalses del Canal, para el consumo humano e industrial, por aproximadamente un año.
2. Las prioridades de uso de las aguas han variado a través de los años siendo para el paso de los buques la más importante, durante la administración estadounidense, y el suministro de agua para el consumo humano e industrial la prioridad número uno en la actualidad.

3. El volumen útil disponible en el embalse de Alhajuela se ha visto afectado debido a los efectos de sedimentación. Se estima que su capacidad útil ha disminuido un 13% de acuerdo a los datos preliminares suministrados por la Sección de Topografía, Hidrografía y Cartografía (en septiembre de 2012) basados en la batimetría realizada en el embalse entre diciembre 2010 y enero 2011. Cuando se diseñaron las curvas guías actuales se asumió un 0% de sedimentación, es decir, con la capacidad original del embalse en 1934.
4. El modelo permitirá, posteriormente, seleccionar la curva de capacidad original de Alhajuela o la más actualizada (2012). Debido a que algunos modelos utilizados en la sección no permiten esta opción, es probable que los resultados actuales estén sobreestimados.

El modelo está programado para simular los aportes y demandas en los embalses utilizando los registros históricos de los últimos 20 años (1991-2010). Toda el agua, vertida o por generación hidroeléctrica, de la represa de Madden pasa directamente al embalse de Gatún. Las reglas de operación tienen como prioridad satisfacer las demandas y luego mantener los niveles operativos lo más cercanos a las curvas guías siempre y cuando se pueda optimizar la generación hidroeléctrica. Estas prioridades son, en orden descendente, uso del agua para consumo humano e industrial, paso de los buques por el Canal (esclusajes) y generación hidroeléctrica. Los derrames desde Gatún no son un uso pero por falta de capacidad de almacenamiento es necesario realizar vertidos, programados o por emergencias, al mar.

El éxito de la gestión eficiente del modelo propuesto radica, fundamentalmente, en la programación de las decisiones lógicas requeridas para la generación hidroeléctrica en Madden. Aquí está el eje central del modelo ya que permite optimizar el uso del agua en Alhajuela y, por lo tanto, evitar derrames innecesarios. Al mismo tiempo, permite reducir la generación cuando los embalses se acercan a los niveles mínimos a menos que se requiera una transferencia de agua. Para distribuir y balancear la capacidad disponible de los embalses, se aplicó un coeficiente de distribución del volumen total de agua en el sistema. Esta fórmula permite que se mantenga un volumen de reserva balanceado cuando las restricciones de calado (en Gatún) y el abastecimiento de agua potable (Alhajuela más Gatún) no estén en riesgo. Es importante mencionar que este programa, en ningún momento, lee el futuro o tiene acceso a los datos de los meses subsecuentes, es decir, la toma de decisiones se basa única y exclusivamente en los aportes y demandas del mes en curso y no a los posibles eventos por ocurrir.

Días en el mes	ESC. Neta MAD + GAT	Demandas Total Mensual	ESC. Neta Total - Demandas	MES	Sin demandas	Elevación sobre curva guía		Capacidad sobre curva guía		Comparación	Mad. H. > Min. > Curva	Mad. Hidro. Si H > Min. < Curva	Madden > Curva y Gatun < Curva	Hydro. Madden + necesidad Gatún	Generación máxima en Madden	2 opciones HIDRO Madden
					Balance volúmenes	Madden	Gatún	Madden	Gatún	Madden y Gatun sobre curva						
31	5,451	(8,798)	(3,348)	ENE	0.54	(0.10)	0.00	(54)	0	FALSE	(3,475)	(4,743)	FALSE	0	0	(3,475)
28	(566)	(8,069)	(8,635)	FEB	0.60	0.02	(0.01)	11	(52)	FALSE	(3,483)	(4,862)	TRUE	(3,534)	(3,534)	(3,534)
31	(1,492)	(8,798)	(10,290)	MAR	0.65	(2.86)	(0.18)	(1,382)	(846)	FALSE	(3,590)	(5,732)	FALSE	0	0	(3,590)
30	866	(8,555)	(7,690)	ABR	0.69	(5.08)	(0.34)	(2,127)	(1,564)	FALSE	(3,828)	(5,868)	FALSE	0	0	(3,828)
31	12,037	(8,798)	3,238	MAY	0.49	(5.90)	(0.29)	(2,048)	(1,317)	FALSE	(3,341)	(4,286)	FALSE	0	0	(3,341)
30	19,733	(8,555)	11,178	JUN	0.48	(2.87)	(0.01)	(956)	(32)	FALSE	(7,950)	(4,082)	FALSE	0	0	(7,950)
31	24,898	(8,798)	16,100	JUL	0.46	(0.03)	(0.01)	(8)	(32)	FALSE	(9,412)	(4,088)	FALSE	0	0	(9,412)
31	19,772	(8,798)	10,973	AGO	0.45	(0.01)	0.70	(3)	3,246	TRUE	(6,474)	(3,930)	FALSE	0	0	(6,474)
30	17,027	(8,555)	8,471	SEP	0.53	0.02	0.06	9	297	TRUE	(4,953)	(4,534)	FALSE	0	0	(4,953)
31	19,303	(8,798)	10,505	OCT	0.49	0.03	(0.01)	14	(33)	TRUE	(3,074)	(4,313)	TRUE	(3,107)	(3,107)	(3,107)
30	30,495	(8,555)	21,940	NOV	0.44	0.01	(0.01)	3	(38)	TRUE	(4,146)	(3,748)	TRUE	(4,184)	(4,184)	(4,184)
31	22,445	(8,798)	13,646	DIC	0.52	0.01	(0.01)	5	(57)	FALSE	(7,967)	(4,571)	TRUE	(8,025)	(8,025)	(8,025)
31	32,746	(8,798)	23,948	ENE	0.50	0.04	(0.01)	20	(61)	FALSE	(9,642)	(4,365)	TRUE	(9,704)	(9,500)	(9,642)
28	7,291	(8,069)	(778)	FEB	0.56	2.94	0.49	1,570	2,322	TRUE	(8,513)	(4,508)	FALSE	0	0	(8,513)
31	4,229	(8,798)	(4,569)	MAR	0.62	(0.01)	(0.01)	(3)	(42)	TRUE	(7,801)	(5,487)	FALSE	0	0	(7,801)
30	1,991	(8,555)	(6,565)	ABR	0.69	0.02	(0.01)	8	(35)	TRUE	(7,276)	(5,927)	TRUE	(7,310)	(7,310)	(7,310)
31	16,802	(8,798)	8,003	MAY	0.60	0.02	(0.01)	7	(32)	TRUE	(9,642)	(5,292)	TRUE	(9,674)	(9,500)	(9,642)
30	20,915	(8,555)	12,359	JUN	0.52	2.91	(0.01)	1,017	(32)	TRUE	(9,331)	(4,471)	TRUE	(9,363)	(9,363)	(9,363)
31	20,672	(8,798)	11,873	JUL	0.48	4.76	0.14	1,633	664	TRUE	(9,169)	(4,256)	FALSE	0	0	(9,169)
31	24,333	(8,798)	15,535	AGO	0.46	(0.01)	0.29	(3)	1,348	TRUE	(8,019)	(4,015)	FALSE	0	0	(8,019)
30	20,967	(8,555)	12,411	SEP	0.43	0.02	0.64	9	2,956	TRUE	(4,896)	(3,713)	FALSE	0	0	(4,896)
31	23,230	(8,798)	14,431	OCT	0.48	0.03	(0.01)	14	(33)	TRUE	(4,622)	(4,230)	TRUE	(4,655)	(4,655)	(4,655)
30	34,494	(8,555)	25,939	NOV	0.42	0.01	(0.01)	3	(38)	TRUE	(5,097)	(3,632)	TRUE	(5,135)	(5,135)	(5,135)
31	24,277	(8,798)	15,479	DIC	0.58	0.01	0.19	5	894	TRUE	(9,642)	(5,139)	FALSE	0	0	(9,642)

Figura 12 - Cálculos para determinar la generación hidroeléctrica óptima en Madden

A continuación los pasos utilizados para el cálculo de la generación hidroeléctrica de Madden del modelo propuesto en este proyecto:

1. La demanda total mensual es igual al agua extraída de los embalses de Alhajuela y Gatún para consumo humano e industrial más el volumen empleado en esclusajes (de las esclusas de Pedro Miguel más las de Gatún).
2. El coeficiente para el balance de los embalses es igual a la capacidad útil de Alhajuela entre la suma de esta misma más la de Gatún.
3. Si las elevaciones en ambos embalses son mayores que los dictados por sus curvas guías entonces la generación en Madden es la máxima permitida siempre y cuando se evite verter en Gatún a menos que sea por control de inundaciones. Si la elevación de Gatún es mayor que la señalada por su respectiva curva guía y, en Alhajuela no lo es, entonces no hay generación hidroeléctrica en Madden.
4. Si el nivel de Alhajuela es mayor que la curva guía pero en Gatún no lo es entonces la generación en Madden es igual a la demanda total mensual por el coeficiente para el balance de los embalses siempre y cuando no exceda la máxima generación posible.
5. Si la elevación de Alhajuela, aun cuando se esté generando al máximo, sobrepasa el nivel máximo operativo entonces se vierte el agua a Gatún.
6. En Gatún, igual que en las operaciones reales, hay generación hidroeléctrica si el nivel del embalse está por encima de la curva guía. Recordar que la prioridad es, primero, suplir las necesidades de agua para el consumo humano e industrial y, segundo, los esclusajes.
7. Si la elevación de Gatún, aun cuando se esté generando al máximo, sobrepasa el nivel máximo operativo entonces se vierte el agua al mar.
8. Las capacidades de los embalses (en MPC), a partir de las elevaciones H (en pies), están definidas por las siguientes ecuaciones:
    - Alhajuela = 2.89551*H^2 - 915.716*H + 75112.6
    - Gatún = 199.3 - 267.07*H + 28.365*H^2
9. Para convertir las capacidades (volúmenes V en MPC) a niveles (pies):
    - Alhajuela = - 0.0000000000000000504*V^4 + 0.000000000005275553*V^3 - 0.0000002271942*V^2 + 0.0065953383254463*V + 160.234
    - Gatún = - 0.000000000304*V^2) + 0.000330477672*V + 34.820293852755

Datos Blue Books	Madden	El. Inicial	252.98	249.33	241.11	233.18	231.14	220.78	221.27	234.87	243.35	245.35	247.24	254.75	247.90
		Vol. Inicial	28,766	26,808	22,676	19,052	18,177	14,100	14,279	19,794	23,764	24,760	25,721	29,743	
		Aportes	5,378	2,003	2,836	5,410	4,918	4,269	8,274	8,643	7,636	7,963	12,509	6,091	
		Potable H+ I	522	473	521	513	532	505	526	519	500	517	497	523	
		Hidroeléctrica	5,814	5,607	5,883	5,716	8,408	3,529	2,176	4,099	6,083	6,429	7,137	6,902	
		Derrames	945	-	-	-	-	-	-	-	-	-	796	2,274	
		Vol. Final =	26,863	22,731	19,108	18,233	14,155	14,335	19,851	23,819	24,817	25,777	29,800	26,134	
		Elev. Final	249.24	241.34	233.59	231.56	220.99	221.50	235.27	243.50	245.42	247.23	254.57	247.90	
		Elev. Real	249.33	241.11	233.18	231.14	220.78	221.27	234.87	243.35	245.35	247.24	254.75	247.93	247.93
		Dif. Elev.	-0.09	0.23	0.41	0.42	0.21	0.23	0.40	0.15	0.07	-0.01	-0.18	-0.03	1.80
		Vol. Real	26,808	22,676	19,052	18,177	14,100	14,279	19,794	23,764	24,760	25,721	29,743	26,077	
		Dif. MCF	55	56	56	55	55	56	57	55	57	55	58	57	
	Gatún	El. Inicial	87.91	87.24	86.61	85.90	85.84	86.04	85.06	85.94	87.12	86.81	87.34	87.84	87.53
		Vol. Inicial	195,928	192,779	189,841	186,558	186,281	187,203	182,709	186,742	192,218	190,772	193,247	195,597	
		Aportes	6,554	(1,299)	(1,382)	1,397	1,128	4,103	8,965	15,403	10,666	10,023	25,285	2,124	
		Esclusajes	7,886	6,740	7,373	6,934	7,027	6,500	6,680	6,802	6,146	6,613	6,683	7,667	
		Potable H+ I	277	385	351	374	371	393	394	395	391	417	414	418	
		Hidroeléctrica	6,604	105	45	65	1,199	5,219	20	6,814	11,644	6,929	11,341	4,303	
		Derrames	1,679	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12,418	356	
		Vol. Final =	192,795	189,857	186,573	186,297	187,220	182,723	186,755	192,233	190,786	193,264	195,609	194,153	
		Elev. Final	87.24	86.61	85.90	85.85	86.04	85.07	85.94	87.12	86.81	87.34	87.84	87.53	
		Elev. Real	87.24	86.61	85.90	85.84	86.04	85.06	85.94	87.12	86.81	87.34	87.84	87.52	87.52
		Dif. Elev.	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04
		Vol. Real	192,779	189,841	186,558	186,281	187,203	182,709	186,742	192,218	190,772	193,247	195,597	194,092	
		Dif. MCF	16	16	16	16	17	14	13	15	14	16	11	61	
Elevaciones según los DAILYS		Madden Final	249.35	241.10	233.16	230.88	221.01	221.15	234.18	243.40	245.37	247.09	250.87	252.44	247.96
		Dif. Elev.	0.02	-0.01	-0.02	-0.26	0.23	-0.12	-0.69	0.05	0.02	-0.15	-3.88	4.51	-0.03
		Gatún Final	87.21	86.58	85.85	85.80	86.01	85.01	85.82	87.06	86.85	87.27	87.79	87.58	87.26
		Dif. Elev.	-0.03	-0.03	-0.05	-0.04	-0.03	-0.05	-0.12	-0.06	0.04	-0.07	-0.05	0.06	0.26

Figura 13 - Verificación de los datos de los *"Blue Books"* y *"Dailys"*

10. El programa registra todas las ocasiones (meses) en que los embalses estuvieron debajo de sus niveles mínimos operativos y suma el volumen que hubiese sido requerido para evitar el déficit. La sumatoria de estos valores permite proyectar el volumen necesario de futuras alternativas de suministro de agua. Igualmente anota el volumen total de agua empleado en la generación hidroeléctrica y vertidos.
11. Para verificar los resultados se aplica la ecuación de continuidad, es decir, el equilibrio entre todos los recursos hídricos que ingresan y salen en relación al cambio de volumen del sistema en el intervalo de tiempo determinado por el usuario.

E. Recolección y análisis de los datos existentes

La principal fuente de información del modelo son los "*Blue Books*" que, históricamente, eran libros azules donde se registraban los niveles y usos de las aguas (incluyendo vertidos) de los embalses. Actualmente, toda la información está disponible, en el servidor de EAAR, por medio de archivos digitales del programa Excel (Y:\Bluebooks_Official\Excel Information).

Conjuntamente se utilizaron los "*Dailys*", es decir, la información recolectada diariamente y analizada mensual y anualmente. Desafortunadamente, durante la etapa de verificación del modelo se detectaron inconsistencias y errores en los datos históricos del periodo seleccionado. Cuatro presentaciones sobre el tema fueron dadas a la gerencia y personal de EAAR (19 de septiembre, 15 y 31 de octubre de 2011, y 28 de septiembre de 2012); y una a la alta gerencia de EAA (13 de agosto de 2012). Igualmente se remitieron correos electrónicos sobre el tema.

Debido a que la confiabilidad de los datos afecta directamente los resultados y, por lo tanto, los análisis y conclusiones, a continuación se presentan en las gráficas comparaciones entre los registros más frecuentemente utilizados en la ACP en relación a los aportes y demandas de los embalses de Alhajuela y Gatún (sólo en las variables que exhiben mayores diferencias). Se ha utilizado como referencia el ciclo más crítico de aportes de la historia del Canal de Panamá, es decir, el periodo de El Niño de 1997-1998. En las cinco presentaciones dadas al personal y gerentes de EAAR también se mostraron los resultados de estas diferencias para otros periodos (1991-1992 por ejemplo).

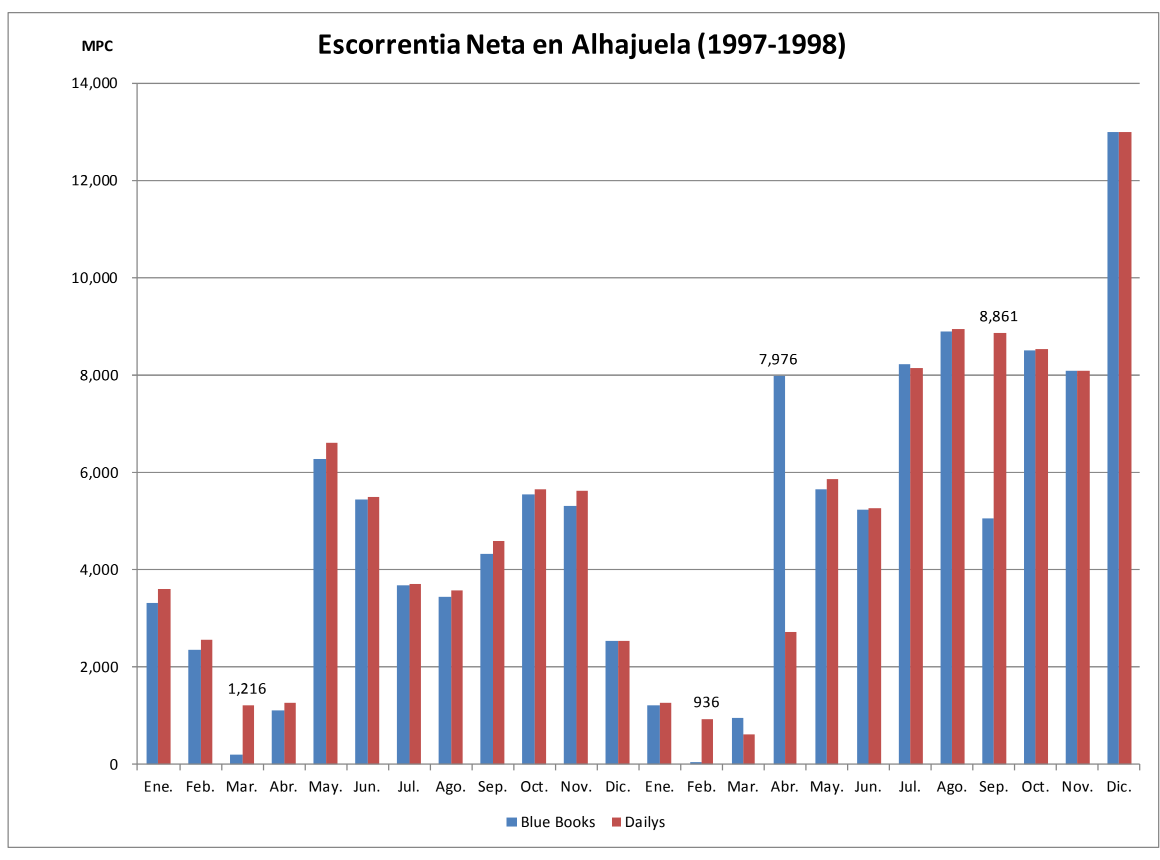
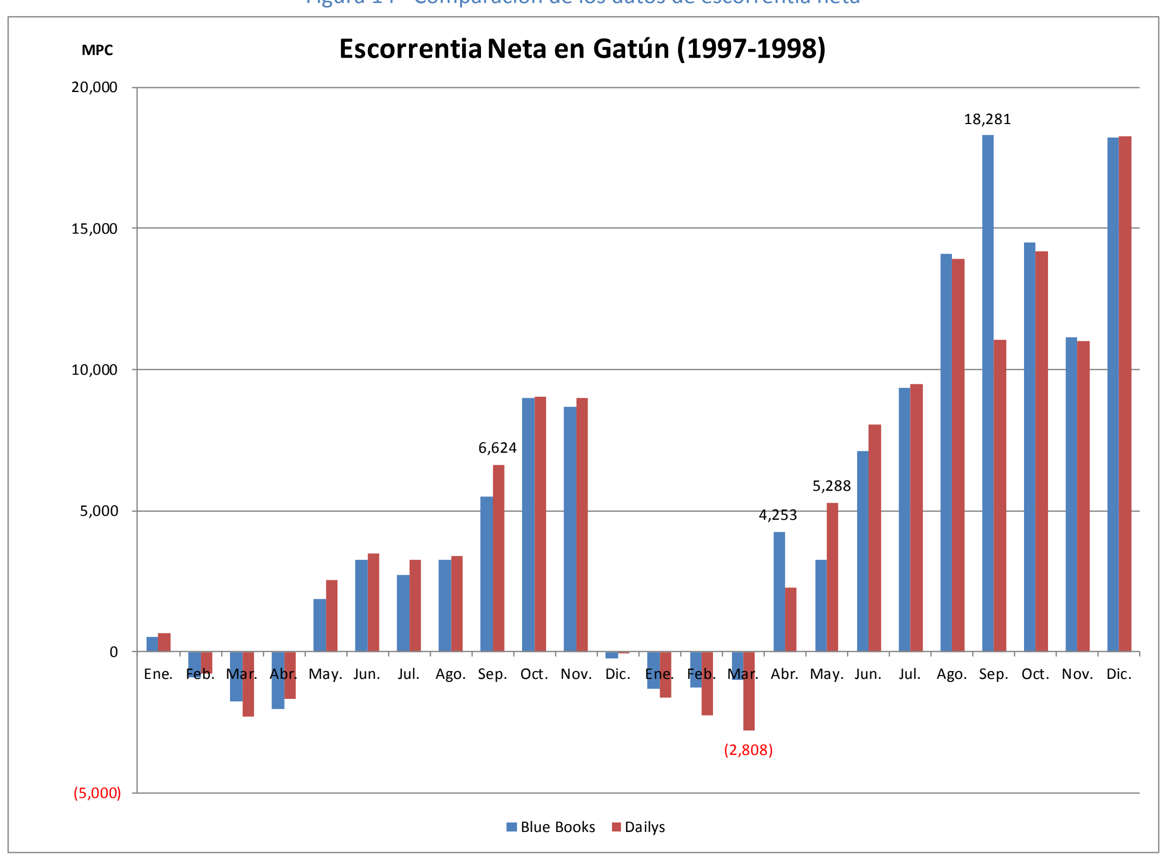


Figura 14 - Comparación de los datos de escorrentía neta



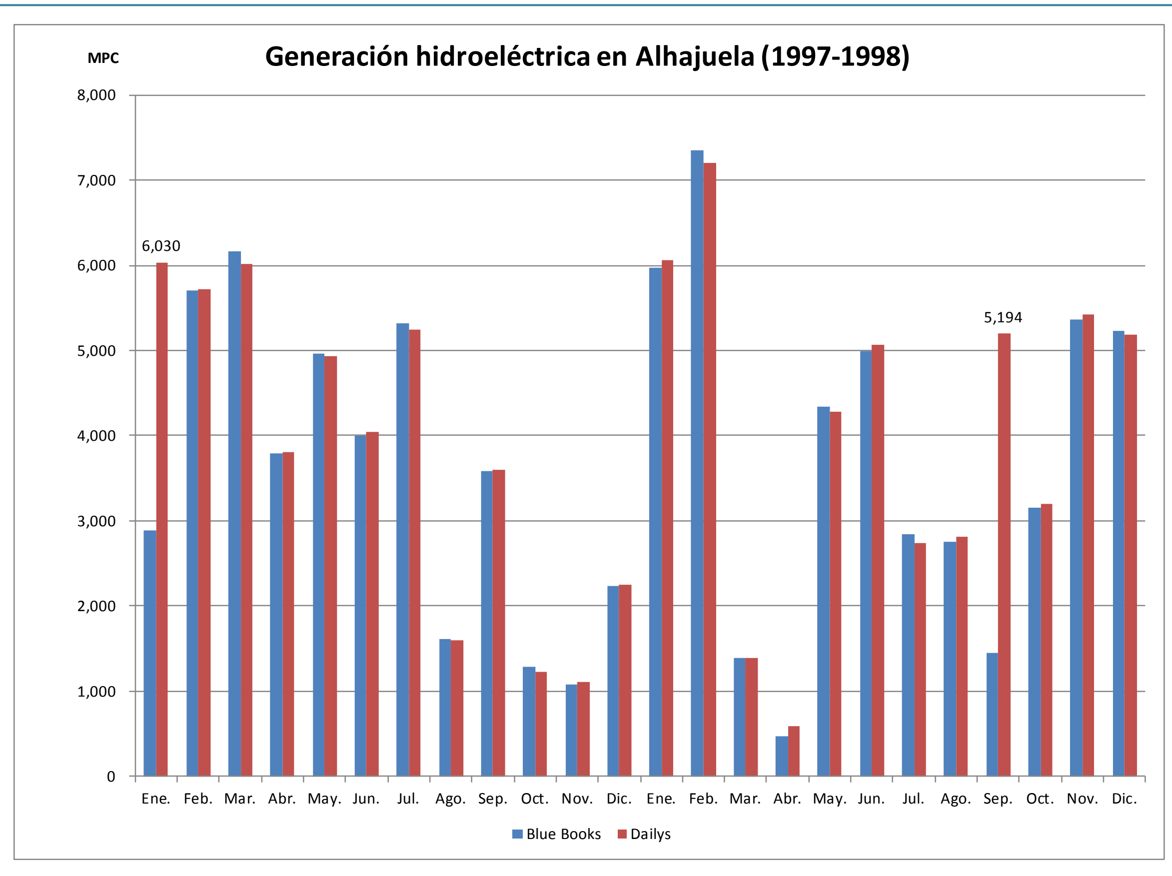
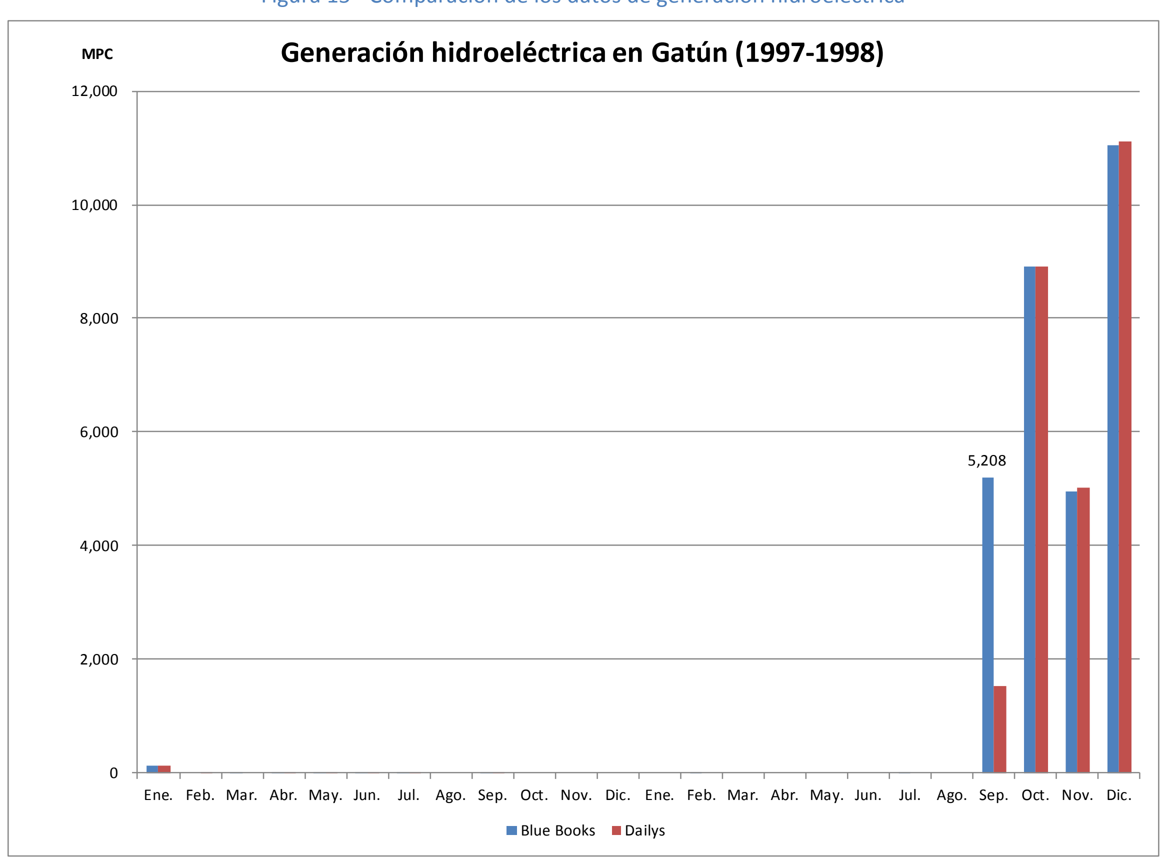


Figura 15 - Comparación de los datos de generación hidroeléctrica



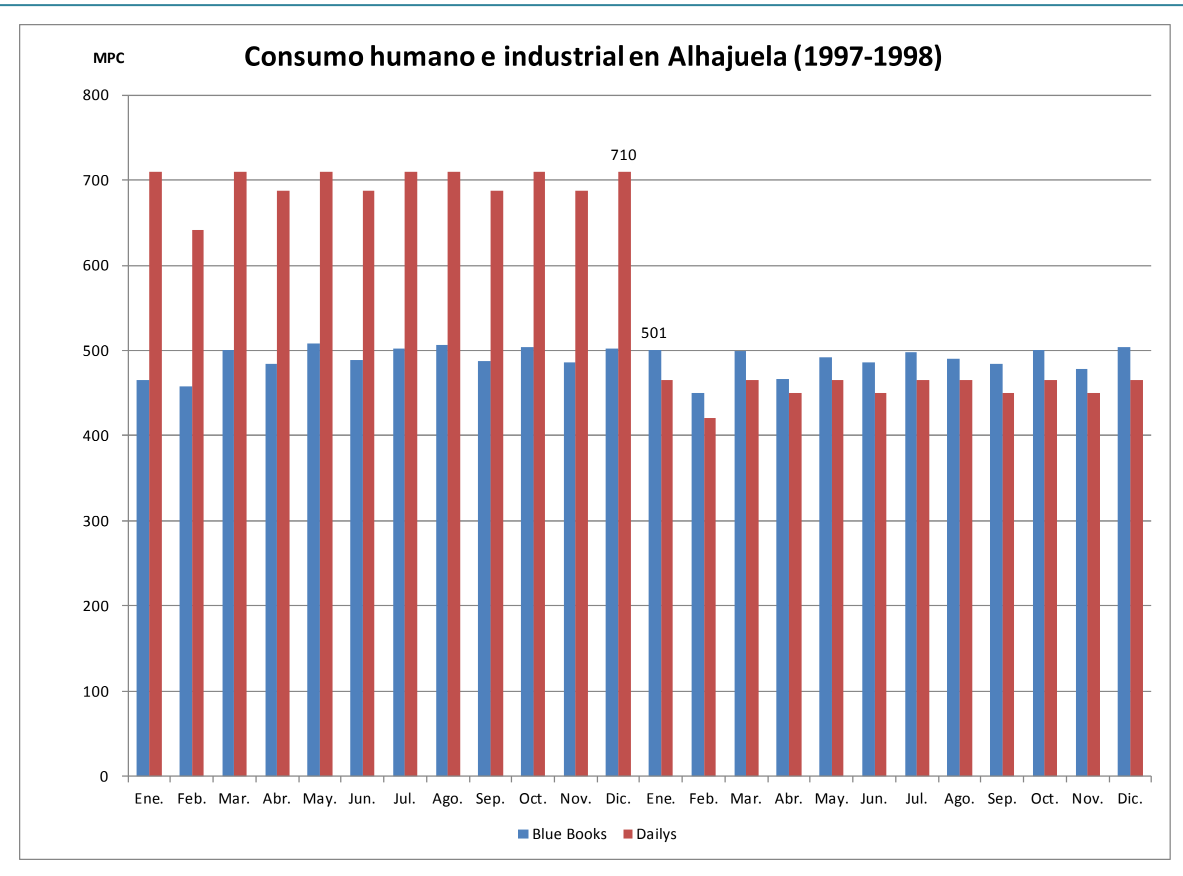
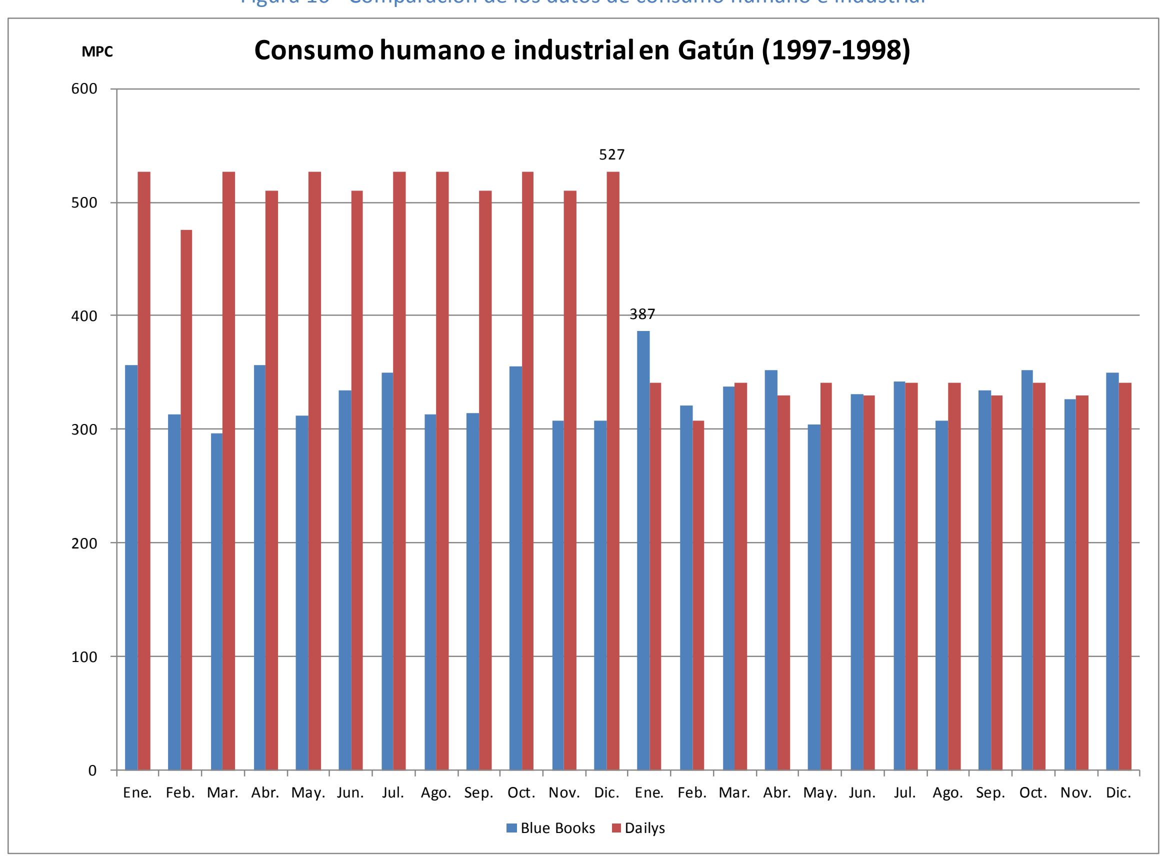


Figura 16 - Comparación de los datos de consumo humano e industrial



F. Verificación y validación del modelo

La finalidad de este paso es confirmar que el modelo opera de la forma que fue programado, los resultados son aceptables y reflejan el funcionamiento de los embalses de Alhajuela y Gatún. Responde una pregunta fundamental ¿realmente funciona? Mediante la verificación se comprueba que todas las partes del sistema funcionan correctamente, en forma individual o en conjunto, y que utilizan los registros indicados en la forma y tiempo adecuado.

La validación responde a tres preguntas básicas:

1. ¿El modelo representa adecuadamente el sistema de la vida real?
2. ¿Los resultados generados por el modelo son característicos o similares a los obtenidos en operaciones regulares?
3. ¿Los usuarios pueden tener confianza en los resultados del modelo?

Después de especificar los componentes, las reglas y las decisiones lógicas, se probó el modelo en forma exhaustiva, parte por parte. Esta prueba se hizo de manera parcial con una versión simplificada de la simulación y, con una hoja de cálculo de Excel, verificando que cada dato perteneciese a la fuente apropiada y que cada resultado fuese aceptable dentro de los límites y parámetros establecidos. También se probaron los componentes y ecuaciones individuales del modelo para verificar que su desempeño interno es razonablemente congruente con la realidad.

Es importante recalcar que, al igual que cualquier modelo de simulación de operaciones, el modelo no es una representación exacta del sistema real. De hecho, parece ser que la mayor parte de los modelos de simulación pecan por ser demasiado realistas en lugar de idealizados.
Para la verificación y validación del funcionamiento del modelo se utilizó la ecuación de continuidad de embalses, es decir, lo que entra menos lo que sale es igual al cambio de almacenamiento. Para verificar que se cumpliera esta ecuación, se utilizaron como datos de prueba los correspondientes al periodo de 1991-1992.

Tal como se explicó en correspondencia remitida a la gerencia, el 6 de septiembre de 2011, lo primero que se hizo fue contrastar los resultados de la simulación usando el modelo propuesto con la información histórica del periodo seleccionado (1991-2010) y los datos de los "*Dailys*" obtenidos mediante el uso del programa ModeloExcelV52_AÑO.xls (creado por el hidrólogo Erick Córdoba en el año 2009). Los resultados no fueron satisfactorios para los años comprendidos entre 1991 y 1996. El programa funcionó, para el periodo de 1997 a 2010 (salvo los errores mencionados en la sección anterior), relativamente bien.

En la siguiente gráfica se muestran los niveles de los "*Dailys*" sin corregir para el embalse de Alhajuela empleando los registros históricos de 1991 (posteriormente se expone la gráfica con los datos corregidos). La línea verde son las elevaciones reales y la línea azul son los datos sin corregir resultado del programa antes mencionado. Afortunadamente, el creador del programa revisó los datos de los "*Dailys*" del periodo 1991-1996 y localizó la información errónea, es decir, los volúmenes de agua para uso humano e industrial para ambos embalses. Estos registros fueron corregidos y, una vez subsanado el problema, se procedió a recolectar y analizar los datos de los "*Blue Books*".

Figura 17 - Niveles de los "Dailys" sin corregir (1991)



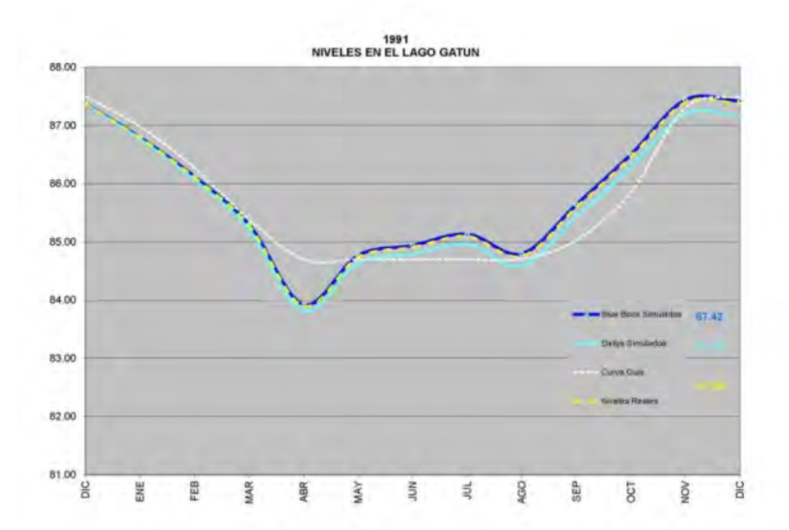
En el análisis de los “*Blue Books*” se detectó que los datos de referencia no eran similares que los “*Dailys*” (de la base de datos del programa ModeloExcelV52_AÑO.xls). En la tabla se compara la información mensual (sólo para Gatún en 1991) de los “*Dailys*” y los “*Blue Books*” para el uso de las aguas utilizadas como demandas del modelo, es decir, consumo humano e industrial, generación hidroeléctrica y esclusajes (cifras expresadas en MPC).

Figura 18 - Comparación de los “Dailys” y “Blue Books” para el lago Gatún (1991)

1991	Consumo humano e industrial		Generación hidroeléctrica		Esclusajes	
Mes	“Dailys”	BB	“Dailys”	BB	“Dailys”	BB
1	310	315	8150	8147	2	2
2	280	346	7942	7934	48	49
3	310	279	8868	8479	33	34
4	300	423	7765	7787	88	88
5	310	297	7420	7414	73	72
6	300	329	7233	7234	113	117
7	310	348	7473	7566	1885	1883
8	310	340	7478	7479	6058	5962
9	300	341	6965	6969	6689	6537
10	310	331	7372	7338	6203	6233
11	300	302	7362	7362	8210	8246
12	310	338	7579	7714	3941	4073

Aun cuando las diferencias, en su mayoría, pudiesen considerarse insignificantes desde el punto de vista de volumen (MPC), la acumulación de estas al realizar simulaciones de uno, dos o más años aumenta el margen de error y puede llevar al modelo a presentar resultados no confiables. La gráfica exhibe cómo la diferencia de niveles, entre los reales (línea amarilla) y los simulados con el modelo utilizando la información de los “*Dailys*” (línea celeste), se va incrementando cada mes.

Figura 19 - Error acumulativo de los “Dailys” para el lago Gatún (1991)



El próximo paso, ya que el periodo seleccionado para validar el modelo es de 1991 a 1992, se procedió a analizar los datos de 1992 encontrándose en este evento errores en los registros. En las gráficas de la siguiente página se muestran los resultados de la simulación usando la información de los "*Dailys*" (línea celeste) y "*Blue Books*" (línea azul) para ese año. La línea amarilla es la elevación real mensual de Alhajuela (gráfica a la izquierda) y Gatún (derecha).

A diferencia del año 1991, donde los "*Dailys*" presentaban datos inconsistentes en este año simulado (1992), los errores se manifiestan en los "*Blue Books*". Entre los errores detectados están los siguientes: la cantidad de agua utilizada para la generación hidroeléctrica en Madden para noviembre fue de 5,155 MPC "*Dailys*" versus 8,063 "*Blue Books*" y en Gatún para el mismo mes de 8,060 MPC versus 5,239 MPC "*Blue Books*". Además, los derrames para Gatún, en noviembre, varían de 574 MPC "*Dailys*" a 1,488 MPC "*Blue Books*". Para poder verificar y validar el modelo se procedió a corregir los datos en las hojas de Excel del modelo de simulación propuesto (gráfica 4), sin embargo, queda pendiente la verificación y corrección oficial de los datos de los "*Blue Books*" y "Dailys" por parte de los encargados de la base de datos de EAAR.

La siguiente tabla (celeste), mostrada luego de las gráficas, presenta los datos de los "*Blue Books*" sin corregir, para ambos embalses, de 1992. La tabla verde muestra los datos corregidos utilizando como referencia, para noviembre, los registros de los "*Dailys*". Más adelante, utilizando el modelo de simulación y los datos corregidos de los "*Blue Books*", se graficaron los niveles de los embalses. Se puede observar una gran similitud en el comportamiento de los niveles de los embalses utilizando los datos corregidos de los "*Blue Books*" versus las elevaciones que se dieron en la realidad. Por lo anterior, se utilizarán los datos corregidos de los "*Blue Books*" como referencia. En las tablas se tabularon los resultados obtenidos mediante la ecuación de continuidad utilizando los niveles iniciales, demandas y vertidos históricos de los "*Blue Books*" sin corregir versus los niveles reales mensuales que se dieron en 1992. Con los registros sin corregir, las diferencias en los niveles simulados y reales son de 4.34´y 1.04´ en Alhajuela y Gatún. Estas diferencias se reducen a 1.08´y 0.02´con los datos corregidos extraoficialmente.

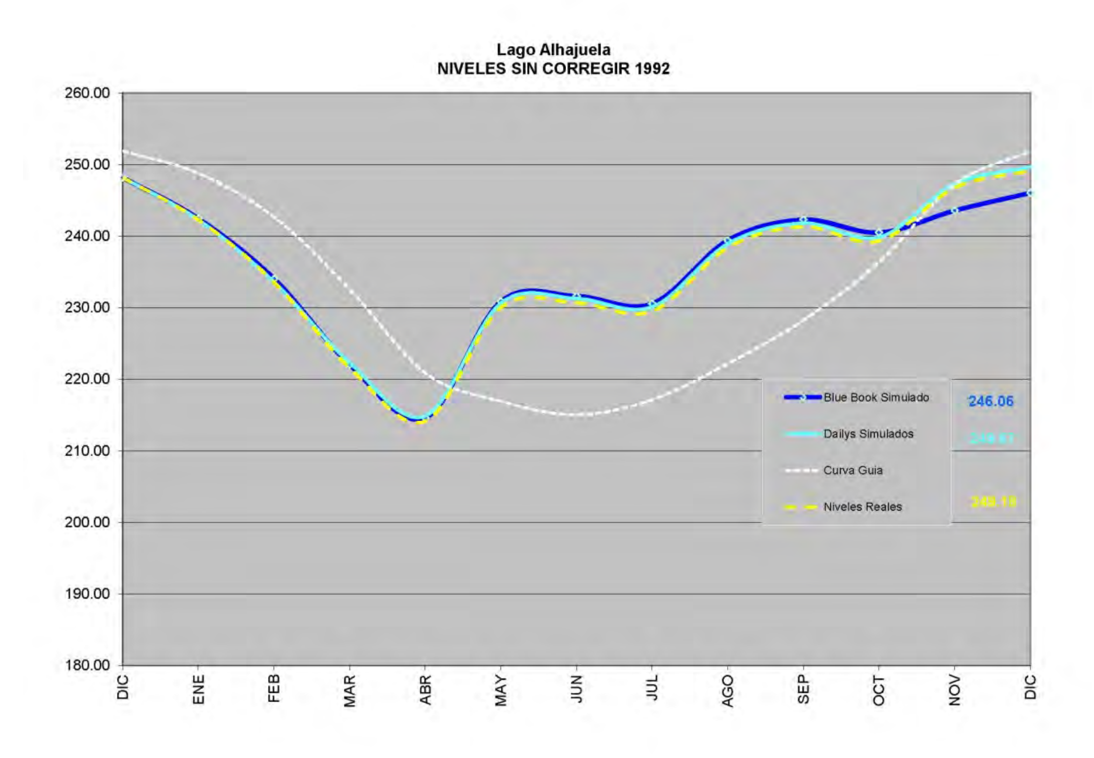
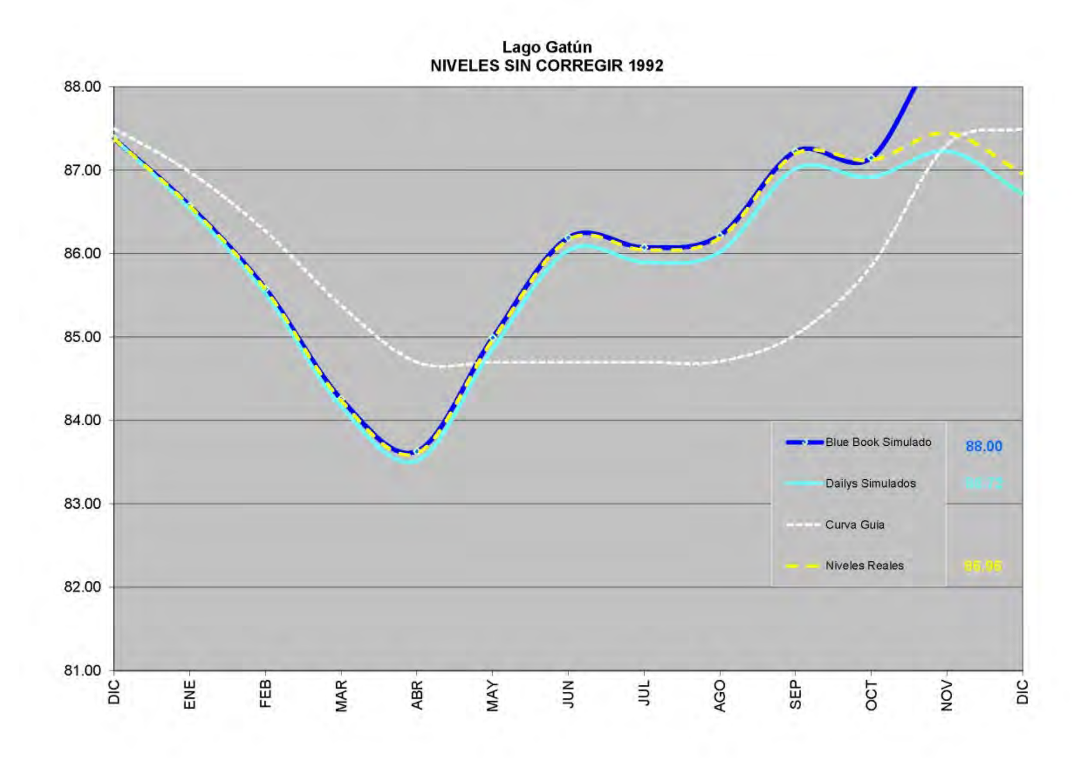


Figura 20 - Datos de los “Blue Books” sin corregir para Alhajuela y Gatún (1992)



Alhajuela 1992	El. Inicial	248.19	242.44	234.05	222.07	214.63	230.87	231.63	230.58	239.41	242.30	240.51	242.31	244.84
	Vol. Inicial	26,212	23,281	19,309	14,539	12,024	17,945	18,262	17,823	21,787	23,213	22,320	23,217	
	Aportes	2,617	1,223	940	2,470	10,923	9,609	8,697	12,693	9,575	7,767	9,427	6,302	
	Potable H+ I	429	411	443	430	481	454	472	470	453	478	[illegible]	448	
	Hidroeléctrica	5,119	4,784	5,267	4,555	4,521	8,838	8,664	8,259	7,695	8,182	8,063	4,559	
	Derrames	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-	
	Vol. Final =	23,281	19,309	14,539	12,024	17,945	18,262	17,823	21,787	23,213	22,320	23,217	24,512	
	Elev. Final	242.44	234.05	222.07	214.63	230.87	231.63	230.58	239.41	242.30	240.51	242.31	244.84	
	Elev. Real	242.30	233.60	221.62	214.16	230.05	230.69	229.52	238.43	241.33	239.35	246.79	249.18	249.18
	Dif. Elev.	0.14	0.45	0.45	0.47	0.82	0.94	1.06	0.98	0.97	1.16	**-4.48**	**-4.34**	-4.34
	Vol. Real	23,250	19,235	14,408	11,814	17,720	17,988	17,500	21,411	22,781	21,841	25,491	26,730	
	Dif. MCF	31	74	131	210	225	274	323	375	432	480	(2,273)	(2,218)	
Gatún 1992	El. Inicial	87.38	86.57	85.58	84.26	83.63	84.99	86.19	86.08	86.22	87.23	87.15	88.48	88.00
	Vol. Inicial	193,435	189,675	185,079	179,046	176,232	182,388	187,908	187,369	188,029	192,735	192,377	198,671	
	Aportes	(386)	(1,553)	(2,644)	653	9,640	10,549	8,316	11,970	16,996	12,647	12,141	6,527	
	Esclusajes	8,130	7,514	8,278	7,654	7,654	7,059	7,421	7,495	7,079	7,212	6,892	7,527	
	Potable H+ I	356	311	301	335	312	293	332	287	328	288	291	337	
	Hidroeléctrica	7	2	77	34	38	6,516	9,766	11,786	11,409	11,880	5,239	5,493	
	Derrames	-	-	-	-	-	-	-	-	1,169	1,808	1,488	-	
	Vol. Final =	189,675	185,079	179,046	176,232	182,388	187,908	187,369	188,029	192,735	192,377	198,671	196,400	
	Elev. Final	86.57	85.58	84.26	83.63	84.99	86.19	86.08	86.22	87.23	87.15	88.48	88.00	
	Elev. Real	86.57	85.57	84.24	83.61	84.97	86.17	86.05	86.19	87.20	87.12	87.45	86.96	86.96
	Dif. Elev.	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	**1.03**	**1.04**	1.04
	Vol. Real	189,656	185,041	178,990	176,159	182,299	187,803	187,249	187,895	192,592	192,218	193,763	191,471	
	Dif. MCF	19	38	56	73	89	104	120	134	143	159	4,908	4,929	

Figura 21 - Datos de los "*Blue Books*" sin corregir (arriba) y corregidos (abajo)

Alhajuela 1992	El. Inicial	248.19	242.44	234.05	222.07	214.63	230.87	231.63	230.58	239.41	242.30	240.51	247.88	250.26
	Vol. Inicial	26,212	23,281	19,309	14,539	12,024	17,945	18,262	17,823	21,787	23,213	22,320	26,125	
	Aportes	2,617	1,223	940	2,470	10,923	9,609	8,697	12,693	9,575	7,767	9,427	6,302	
	Potable H+ I	429	411	443	430	481	454	472	470	453	478	[illegible]	448	
	Hidroeléctrica	5,119	4,784	5,267	4,555	4,521	8,838	8,664	8,259	7,695	8,182	5,155	4,559	
	Derrames	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-	
	Vol. Final =	23,281	19,309	14,539	12,024	17,945	18,262	17,823	21,787	23,213	22,320	26,125	27,420	
	Elev. Final	242.44	234.05	222.07	214.63	230.87	231.63	230.58	239.41	242.30	240.51	247.88	250.26	
	Elev. Real	242.30	233.60	221.62	214.16	230.05	230.69	229.52	238.43	241.33	239.35	246.79	249.18	249.18
	Dif. Elev.	**0.14**	**0.45**	**0.45**	**0.47**	**0.82**	**0.94**	**1.06**	**0.98**	**0.97**	**1.16**	**1.09**	**1.08**	1.08
	Vol. Real	23,250	19,235	14,408	11,814	17,720	17,988	17,500	21,411	22,781	21,841	25,491	26,730	
	Dif. MCF	31	74	131	210	225	274	323	375	432	480	635	690	
Gatún 1992	El. Inicial	87.38	86.57	85.58	84.26	83.63	84.99	86.19	86.08	86.22	87.23	87.15	87.47	86.98
	Vol. Inicial	193,435	189,675	185,079	179,046	176,232	182,388	187,908	187,369	188,029	192,735	192,377	193,856	
	Aportes	(386)	(1,553)	(2,644)	653	9,640	10,549	8,316	11,970	16,996	12,647	12,141	6,527	
	Esclusajes	8,130	7,514	8,278	7,654	7,654	7,059	7,421	7,495	7,079	7,212	6,892	7,527	
	Potable H+ I	356	311	301	335	312	293	332	287	328	288	291	337	
	Hidroeléctrica	7	2	77	34	38	6,516	9,766	11,786	11,409	11,880	8,060	5,493	
	Derrames	-	-	-	-	-	-	-	-	1,169	1,808	574	-	
	Vol. Final =	189,675	185,079	179,046	176,232	182,388	187,908	187,369	188,029	192,735	192,377	193,856	191,584	
	Elev. Final	86.57	85.58	84.26	83.63	84.99	86.19	86.08	86.22	87.23	87.15	87.47	86.98	
	Elev. Real	86.57	85.57	84.24	83.61	84.97	86.17	86.05	86.19	87.20	87.12	87.45	86.96	86.96
	Dif. Elev.	**0.00**	**0.01**	**0.02**	**0.02**	**0.02**	**0.02**	**0.03**	**0.03**	**0.03**	**0.03**	**0.02**	**0.02**	0.02
	Vol. Real	189,656	185,041	178,990	176,159	182,299	187,803	187,249	187,895	192,592	192,218	193,763	191,471	
	Dif. MCF	19	38	56	73	89	104	120	134	143	159	92	114	

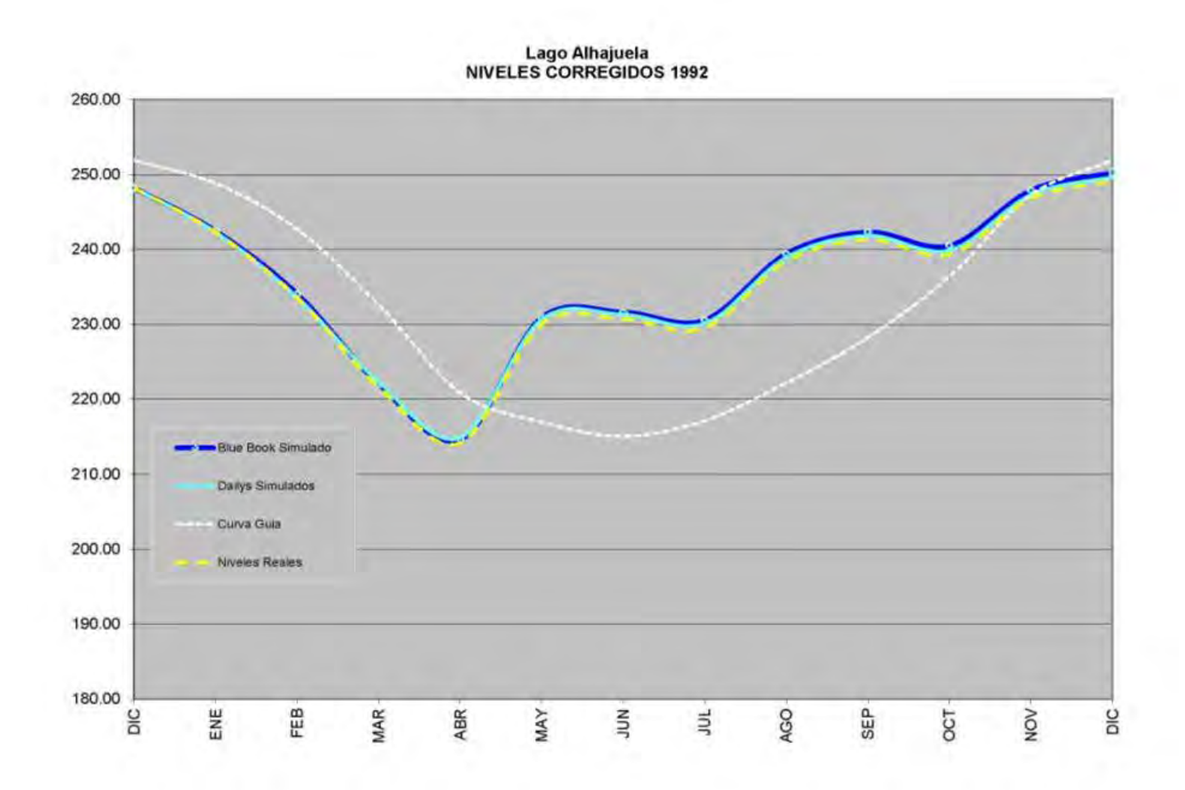
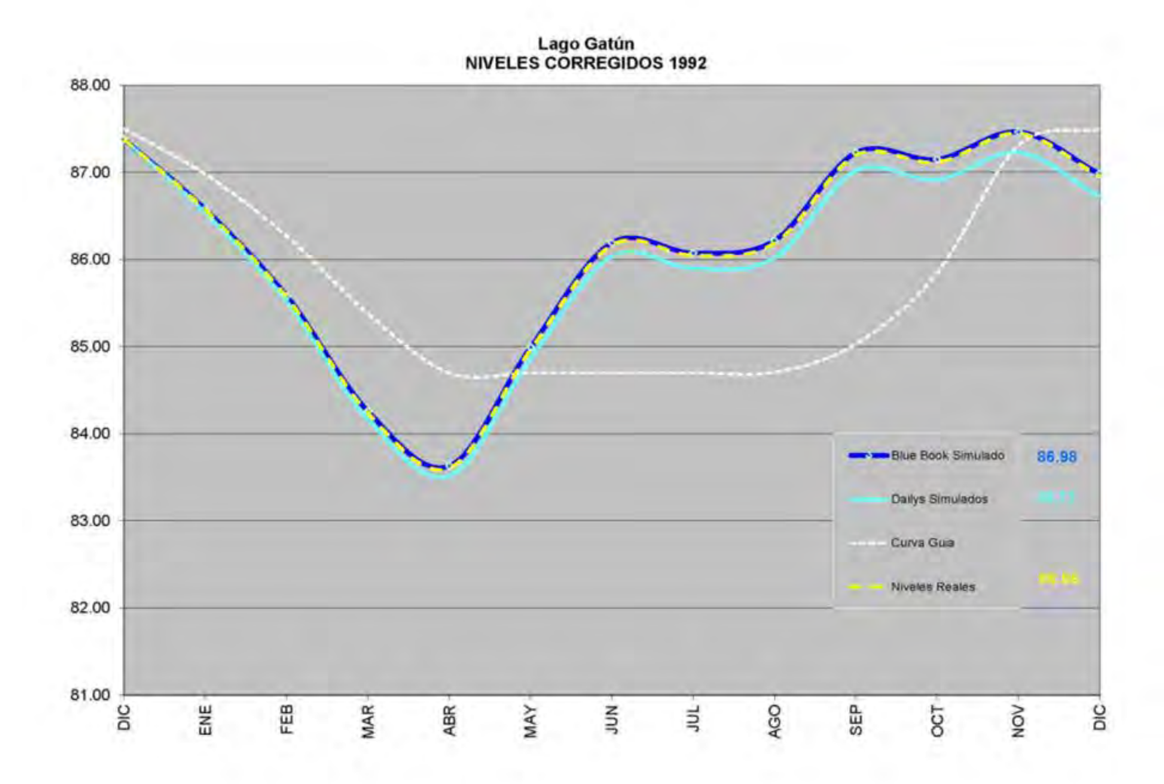


Figura 22 - Niveles de los lagos (1992) luego de su corrección para este estudio



Luego de la verificación, análisis y corrección de los datos del periodo de prueba (año normal es 1991 de acuerdo a los registros de precipitación) se evaluó si éste correspondía realmente a un año normal (promedio)[44] desde el enfoque de escorrentías netas de los últimos 20 años (1991-2010). La tabla 4 muestra los resultados obtenidos. Más adelante se revalúa este tema.

Dato	Año	Esc. Neta	*Dato*	*Esc.Neta*	*Rango*	*%*
1	1991	139143	20	274227	1	100.00%
2	1992	167099	9	240307	2	94.70%
3	1993	182209	6	231947	3	89.40%
4	1994	146621	17	212918	4	84.20%
5	1995	169968	16	195390	5	78.90%
6	1996	231947	10	190552	6	73.60%
7	1997	73328	13	187218	7	68.40%
8	1998	169281	14	184562	8	63.10%
9	1999	240307	3	182209	9	57.80%
10	2000	190552	19	170926	10	52.60%
11	2001	133346	5	169968	11	47.30%
12	2002	158896	8	169281	12	42.10%
13	2003	187218	2	167099	13	36.80%
14	2004	184562	12	158896	14	31.50%
15	2005	143814	4	146621	15	26.30%
16	2006	195390	15	143814	16	21.00%
17	2007	212918	1	139143	17	15.70%
18	2008	115077	11	133346	18	10.50%
19	2009	170926	18	115077	19	5.20%
20	2010	274227	7	73328	20	0.00%

Figura 23 - Cálculo del año promedio de acuerdo a la escorrentía neta (1991-2010)

G. Análisis de sensibilidad

Como se señala en el capítulo anterior, se escogió el periodo de 1991-1992 para verificar y validar el modelo. Todas las simulaciones son por 24 meses a partir de enero del primer año. La intención no es sólo confirmar que los resultados generados por el modelo son característicos o similares a los obtenidos en operaciones regulares sino también que los innovadores algoritmos empleados permiten optimizar el manejo de los recursos hídricos del Canal. Lo anterior se verá

[44] Ver Capítulo I - Definición de términos

validado si, luego de las simulaciones, los resultados del modelo permiten satisfacer plenamente las demandas prioritarias de agua y, simultáneamente, se logra una mayor generación hidroeléctrica, evitando los vertidos de agua y alcanzando los niveles operativos máximos al final de la temporada lluviosa (generalmente en el mes de diciembre).

La tabla 5 muestra la pantalla de ingreso del modelo. Al introducir 1991, como año a simular (primera celda verde arriba a la izquierda), el programa escoge automáticamente (sólo en la fase de verificación del modelo) los niveles iniciales y demandas de ese año en particular (celdas celestes). También se pueden seleccionar los niveles operativos mínimos y máximos de los embalses, capacidad original o actualizada de Madden, curva guía a utilizarse en Gatún, etc. Al elegir las escorrentías netas de referencia (para la simulación de dos consecutivos), los valores mensuales son colocados en la hoja de cálculo y graficados en la parte inferior del título (barras azules y rojas). Abajo a la izquierda, se presentan los resultados de las simulaciones (dos y 20 años), meses en que los niveles de los embalses estuvieron debajo de sus mínimos, etc.

Figura 24 - Pantalla inicial del modelo para la simulación del periodo 1991-1992

	Datos para el inicio de la simulación				Tercer Juego de Esclusas		
	1,991	*1,991*	*1,997*	*2,009*	*2,015*	*2,020*	*2,025*
	Escorrentías netas utilizadas como referencia (años):1991-92						
Aportes	**1**	*1. Promedio*	1991-92	*2. Seco*	1997-98	*3. Lluvioso*	2009-10
	Nivel de Aguas Mínimo de Operación (NAMINO)						
Alhajuela	190	190.00	190.00	190.00	210.00	220.00	230.00
Gatún	81.5	81.5	81.5	81.5	81.0	81.0	81.0
	Nivel de Aguas Máximo de Operación (NAMO)						
Alhajuela	252	250.00	251.90	252.00	255.00	257.00	260.00
Gatún	87.5	87.5	87.5	87.5	89.0	89.0	89.0
	Nivel de Aguas Extraordinarias (NAME)						
Alhajuela	255	255.00	255.00	255.00	255.00	255.00	255.00
Gatún	87.75	87.75	87.75	87.75	90.0	90.0	90.0
	Elevaciones iniciales de los lagos (pies)						
Alhajuela	250.31	250.31	251.99	249.23	252.00	252.00	252.00
Gatún	87.37	87.37	87.62	87.02	89.0	89.0	89.0
	Esclusajes diarios (cantidad)				Pronóstico		
Existentes	31.4	31.4	32.2	34.3	30.1	29.9	28.6
Nuevas	-	-	-	-	5.4	8.0	11.0
	Esclusajes (MPC diarios)				Pronóstico		
Existentes	248	248	251	255	221	220	210
Nuevas	-	-	-	-	37	54	75
	Consumo humano e industrial (MPC mensuales)				Pronóstico		
Alhajuela	439	439	489	830	735	789	842
Gatún	323	323	332	530	526	564	603

Curva de Capacidad de Alhajuela 1 y Curva Guía de Gatún 1

1	Capacidad Madden		1	Curva Guía de Gatún	
	1. 1928	*2. 2008*		*1. Existente*	*2. Nueva*

	Simulación Modelo		Realidad (Blue Books)		Embalses debajo de sus mínimos	
	Hidrogen.	Derrames	Hidrogen.	Derrames	Simulación	Realidad
Madden	140,680	0	139,076	1,926	0 meses	0 meses
Gatún	104,831	0	98,364	9,076	0 meses	0 meses

Implementación de un modelo de simulación de operaciones como herramienta para la evaluación y toma de decisiones sobre las necesidades hídricas del Canal ampliado. Por: Jaime Massot Hernández, Sección de Recursos Hídricos, División de Agua, ACP.

Escorrentía Neta Cuenca Superior (MPC)	Escorrentía Neta Cuenca Inferior (MPC)
2,807	(260)
1,841	(2,148)
2,636	(1,267)
1,516	(1,973)
7,529	6,439
4,681	5,632
5,480	6,292
5,721	6,594
9,601	13,535
7,968	13,478
13,541	17,037
6,720	5,742
2,617	(386)
1,223	(1,553)
940	(2,644)
2,470	653
10,923	9,640
9,609	10,549
8,697	8,316
12,693	11,970
9,575	16,996
7,767	12,647
9,427	12,141
6,302	6,527

Como se observa, la formulación y reglas operativas del modelo propuesto alcanzaron, utilizando como fuente de información los registros corregidos de los "*Blue Books*", una mayor generación hidroeléctrica al mismo tiempo que se logró cumplir con las demandas prioritarias y, a diferencia del registro histórico, se evitaron los derrames desde los vertederos de Madden y Gatún. En la tabla 6 se presentan los resultados de esta simulación. Es importante mencionar que lo anterior es un análisis retrospectivo; en las operaciones reales se desconoce el futuro. Se procede en base a pronósticos meteorológicos que tienen intrínsecamente la incertidumbre. Además, existen eventualidades que afectan la administración de los recursos hídricos como lo son las emergencias, fallos en los equipos, mantenimientos no programados y otros.

Generación hidroeléct.	**Simulación Modelo (resultados en MPC)**		**Realidad "*Blue Books*" (resultados en MPC)**		**Embalses debajo de sus mínimos operativos**	
	Hidrogen.	Derrames	Hidrogen.	Derrames	Simulación	Realidad
Madden	140,680	0	139,076	1,926	0 meses	0 meses
Gatún	104,831	0	98,364	9,076	0 meses	0 meses

Figura 25 - Resultados de la simulación y optimización de las operaciones (1991-1992)

La tabla muestra los valores utilizados en la ecuación de continuidad de los embalses, es decir, el volumen de entrada menos el volumen de salida es igual al cambio de almacenamiento. La ecuación y verificación (balance igual a cero) se aplica primero en Alhajuela y luego en Gatún.

Figura 26 - Ecuación de continuidad en los embalses (1991-1992)

Embalse Alhajuela	250.31	Inicial =	27,318	
	252.04	Final =	28,229	
Cambio de almacenamiento =			-910	MPC
Entradas (escorrentía neta) =			152,283	
Salidas (trasvases, demandas o vertidos) =			(151,372)	
		Entradas - salidas =	910	MPC
		BALANCE =	0	
Embalse Gatún	87.37	Inicial =	193,390	
	87.49	Final =	194,000	
Cambio de almacenamiento =			-610	MPC
Entradas (escorrentía neta + trasvases) =			306,242	
Salidas (demandas o vertidos) =			(304,722)	
		Entradas - salidas =	610	MPC
		BALANCE =	0	

En la gráfica 5 se presentan los comportamientos mensuales de los embalses simulando las demandas de acuerdo a los datos de los "*Blue Books*" y "*Dailys*" y se comparan las elevaciones reales, generación hidroeléctrica y vertidos del periodo 1991-1992 con los obtenidos mediante la simulación del modelo propuesto que incluye algoritmos de optimización.

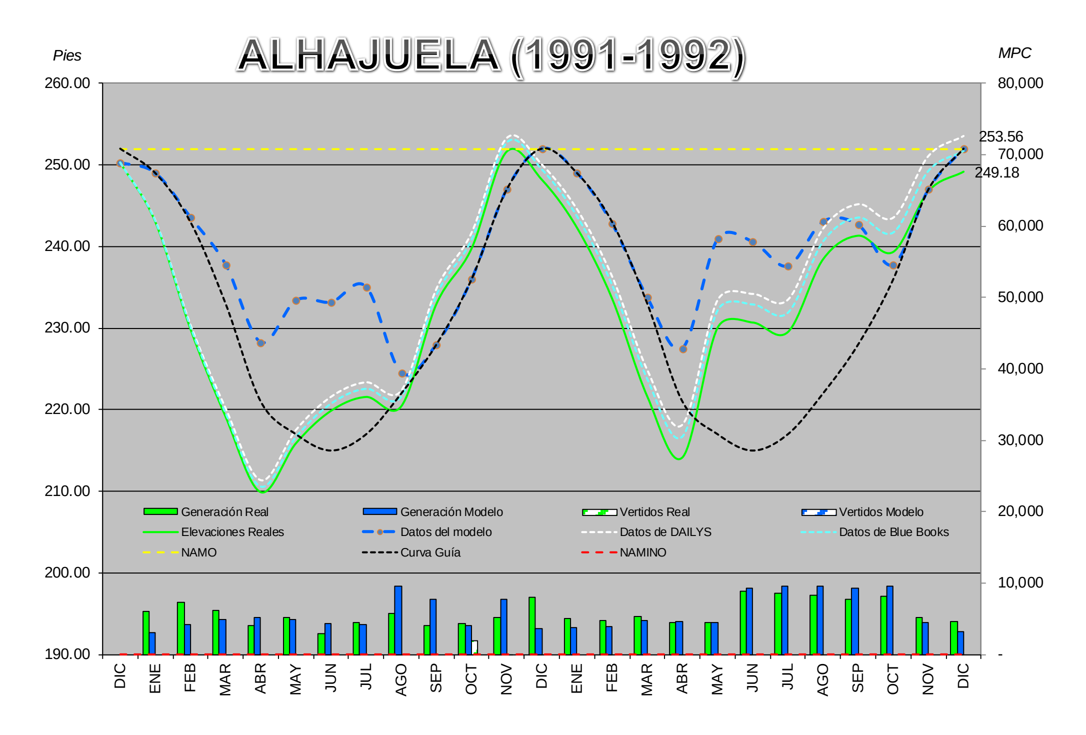
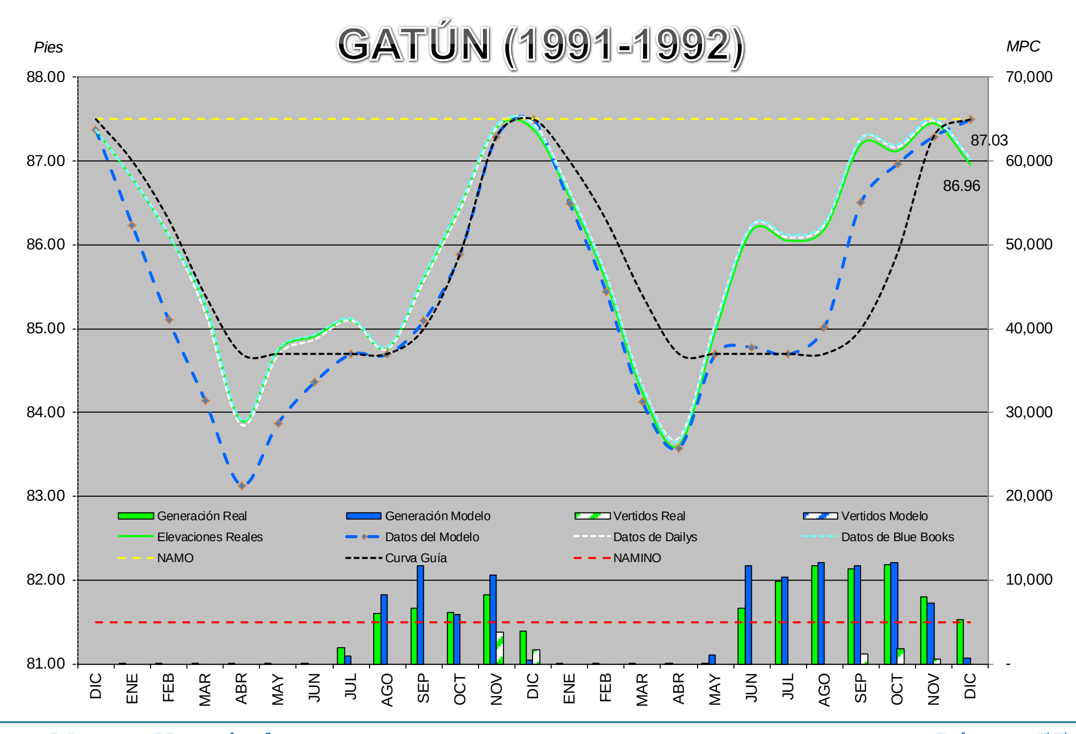


Figura 27 - Niveles reales y simulados en Alhajuela y Gatún (1991-1992)



IV. Presentación y análisis de los resultados

A. Primer objetivo: utilizar el modelo para simular los aportes de los últimos 20 años (1991-2010) y demandas esperadas en los periodos 2015-2034, 2020-2039 y 2025-2044. Determinar la confiabilidad para un calado de 50 pies y calado máximo para los escenarios pronosticados.

Para la simulación de los tres escenarios (2015, 2020 y 2025) se han aplicado los siguientes valores sugeridos por la gerencia de EAAR:

- Demanda por consumo de agua de acuerdo al “Informe del agua de los lagos del Canal de Panamá para el consumo humano” de la ACP de junio de 2011.
- Pronósticos de esclusajes actualizados por la Oficina de Investigación y Análisis de Mercado de la ACP en marzo de 2012.
- Relación elevación-capacidad del lago Alhajuela (sin efectos por sedimentación).
- Escorrentías netas históricas de enero de 1991 a diciembre de 2010.
- Nivel de Aguas Mínimo de Operación de Alhajuela (190 pies) y Gatún (85 pies).
- Nivel de Aguas Máximo de Operación de Alhajuela (251. 90 pies) y Gatún (89 pies).
- Elevaciones iniciales de Alhajuela (251.90 pies) y Gatún (89 pies).
- Calado de navegación en Gatún de 50 pies (elevación correspondiente a 85 pies PLD).

Nota: El modelo asume que siempre se utilizan las tinas de ahorro de agua.

1. Primer escenario: demandas pronosticadas para el año 2015.

- Esclusajes equivalentes diarios por las estructuras existentes (25.51) y nuevas (7.56).
- Uso diario de agua por las esclusas existentes (188 MPC) y nuevas (56 MPC).
- Consumo de agua de la población por mes en Alhajuela (746 MPC) y Gatún (534 MPC).

Resultados: Se prevé restricciones de calado, por seis meses, de febrero a julio del año 2022. El periodo corresponde a los aportes del fenómeno de El Niño de 1997-98. La elevación mínima sería de 81.30´, correspondiente a un calado de 46.30´, en marzo del 2022. La confiabilidad para mantener un calado de 50 pies o más es de 97.5% [(240-6) x100/240].

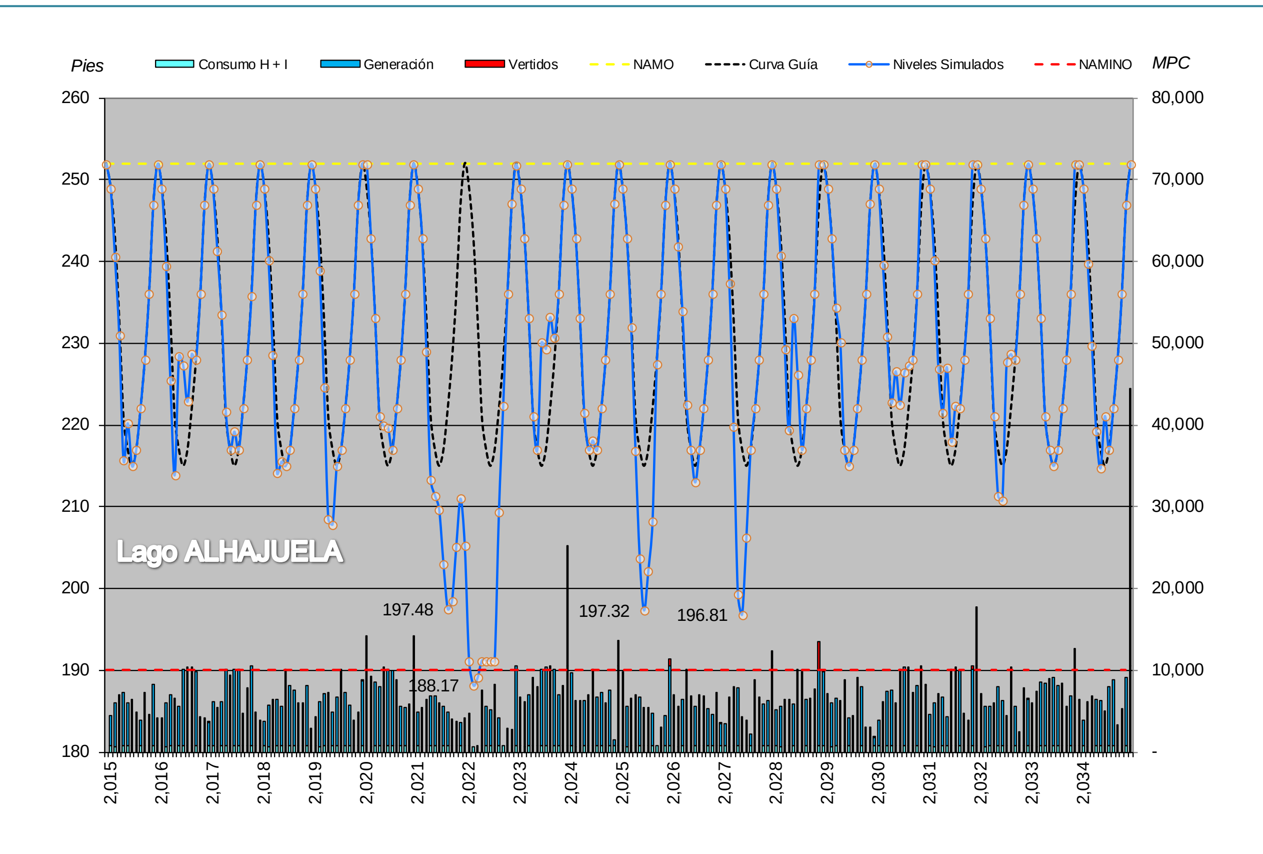
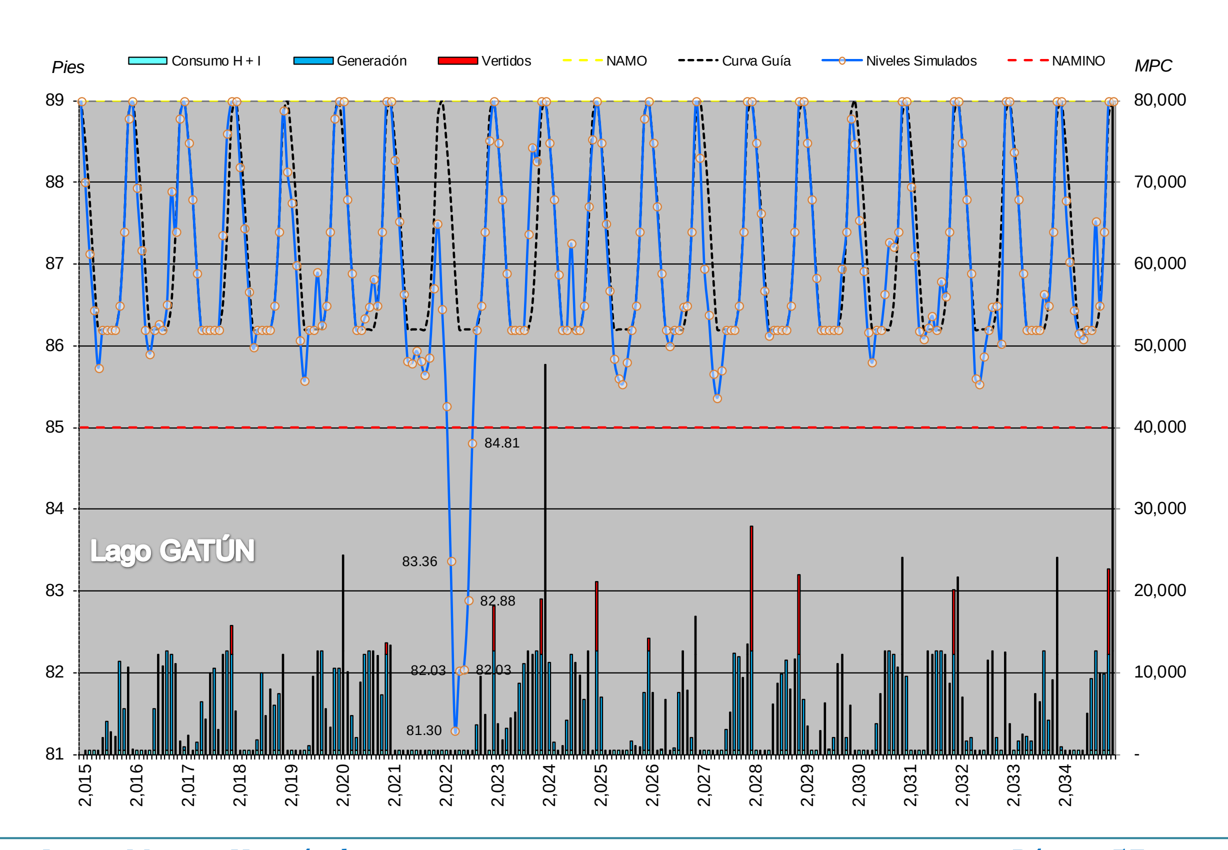


Figura 28 - Resultados del escenario #1 / Periodo 2015-2034

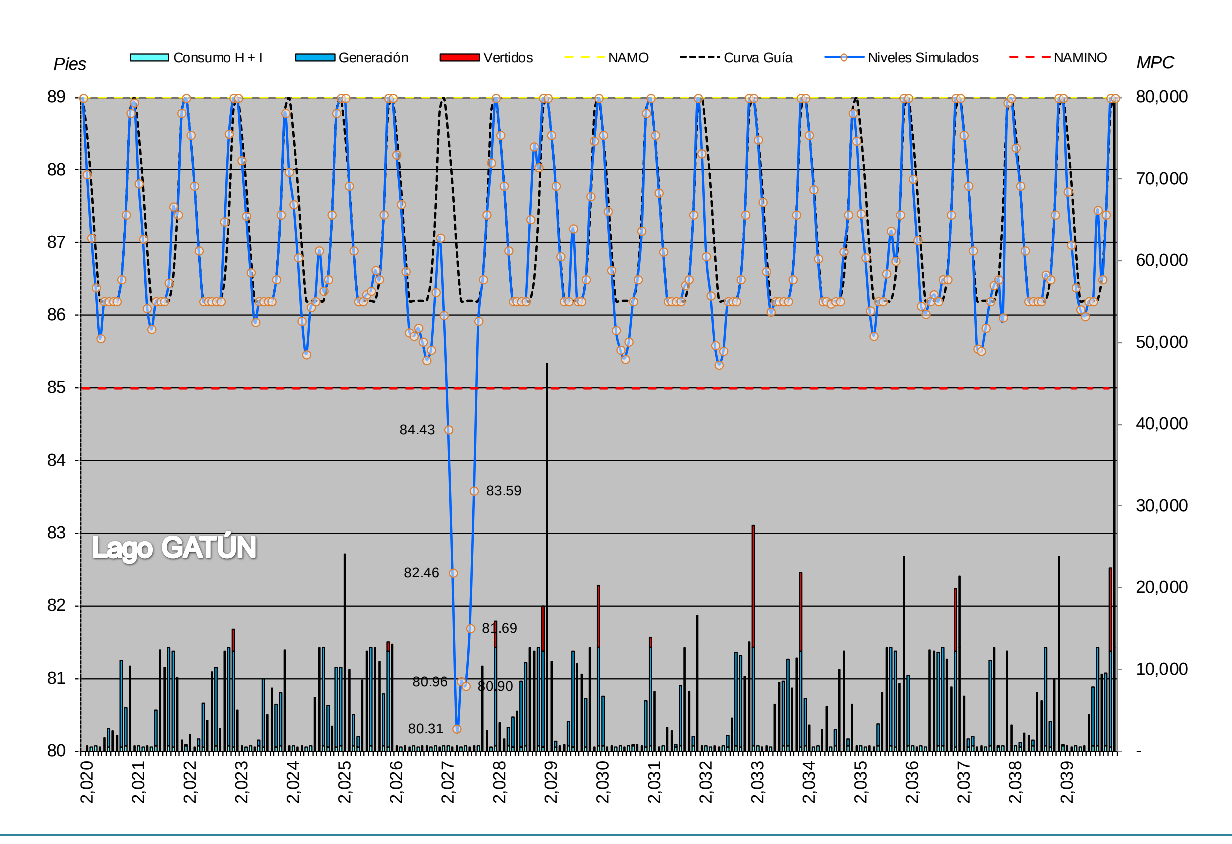


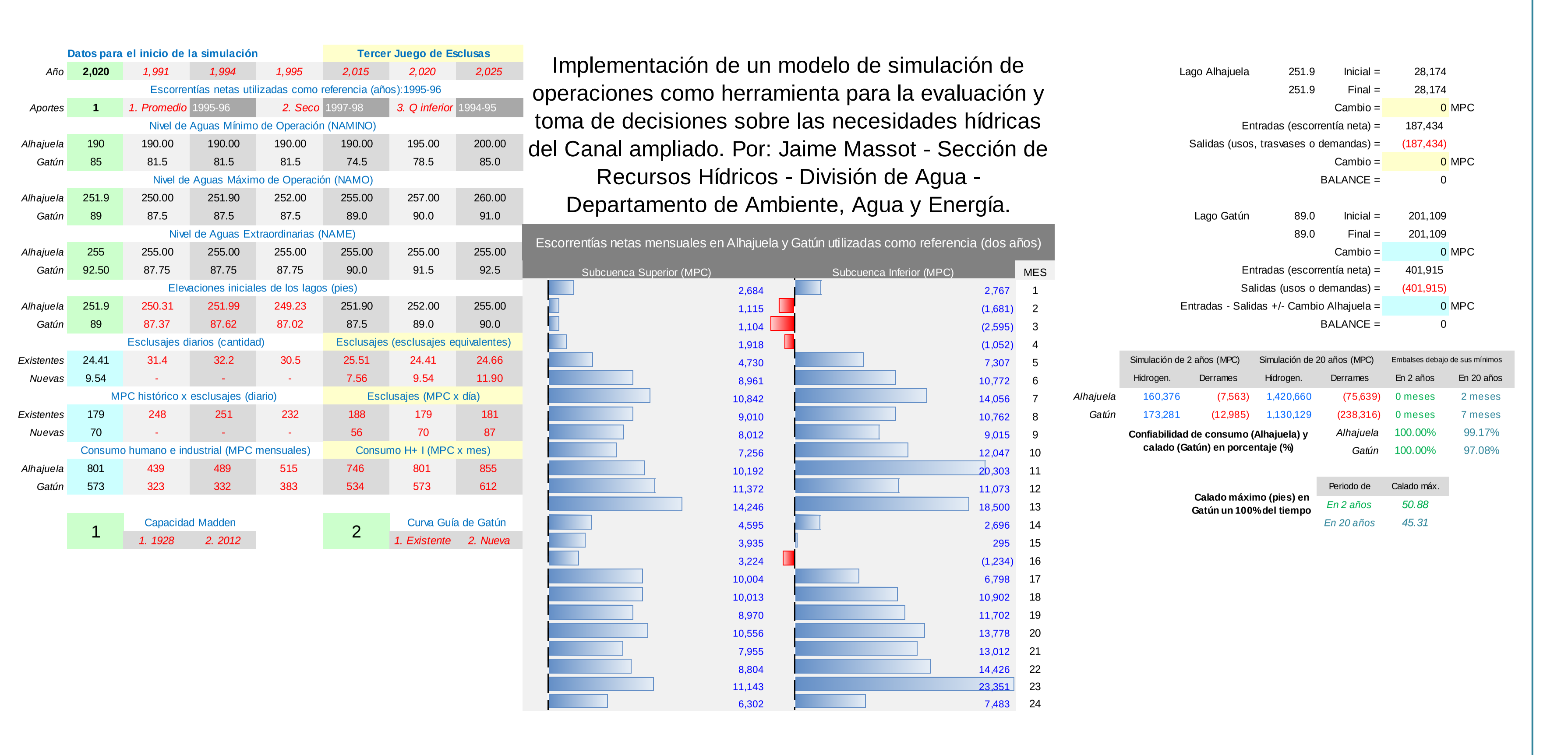
2. Segundo escenario: demandas pronosticadas para el año 2020.

- Esclusajes equivalentes diarios por las estructuras existentes (24.41) y nuevas (9.54).
- Uso diario de agua por las esclusas existentes (179 MPC) y nuevas (70 MPC).
- Consumo de agua de la población por mes en Alhajuela (801 MPC) y Gatún (573 MPC).

Resultados: Se prevé restricciones de calado, por siete meses, de enero a julio del año 2027. El periodo corresponde a los aportes del fenómeno de El Niño de 1997-98. La elevación mínima sería de 80.31´, correspondiente a un calado de 45.31´, en marzo del 2027. La confiabilidad para mantener un calado de 50 pies o más es de 97.1%. En la figura de la siguiente página se observa la hoja de introducción de los datos y resultados para este segundo escenario.

Figura 29 - Resultados del escenario #2 en el lago Gatún / Periodo 2020-2039





	Datos para el inicio de la simulación				Tercer Juego de Esclusas		
Año	2,020	1,991	1,994	1,995	2,015	2,020	2,025
	Escorrentías netas utilizadas como referencia (años):1995-96						
Aportes	1	1. Promedio	1995-96	2. Seco	1997-98	3. Q inferior	1994-95
	Nivel de Aguas Mínimo de Operación (NAMINO)						
Alhajuela	190	190.00	190.00	190.00	190.00	195.00	200.00
Gatún	85	81.5	81.5	81.5	74.5	78.5	85.0
	Nivel de Aguas Máximo de Operación (NAMO)						
Alhajuela	251.9	250.00	251.90	252.00	255.00	257.00	260.00
Gatún	89	87.5	87.5	87.5	89.0	90.0	91.0
	Nivel de Aguas Extraordinarias (NAME)						
Alhajuela	255	255.00	255.00	255.00	255.00	255.00	255.00
Gatún	92.50	87.75	87.75	87.75	90.0	91.5	92.5
	Elevaciones iniciales de los lagos (pies)						
Alhajuela	251.9	250.31	251.99	249.23	251.90	252.00	255.00
Gatún	89	87.37	87.62	87.02	87.5	89.0	90.0
	Esclusajes diarios (cantidad)				Esclusajes (esclusajes equivalentes)		
Existentes	24.41	31.4	32.2	30.5	25.51	24.41	24.66
Nuevas	9.54	-	-	-	7.56	9.54	11.90
	MPC histórico x esclusajes (diario)				Esclusajes (MPC x día)		
Existentes	179	248	251	232	188	179	181
Nuevas	70	-	-	-	56	70	87
	Consumo humano e industrial (MPC mensuales)				Consumo H+ I (MPC x mes)		
Alhajuela	801	439	489	515	746	801	855
Gatún	573	323	332	383	534	573	612

		Capacidad Madden			Curva Guía de Gatún
1	1. 1928	2. 2012	2	1. Existente	2. Nueva

Implementación de un modelo de simulación de operaciones como herramienta para la evaluación y toma de decisiones sobre las necesidades hídricas del Canal ampliado. Por: Jaime Massot - Sección de Recursos Hídricos - División de Agua - Departamento de Ambiente, Agua y Energía.

Escorrentías netas mensuales en Alhajuela y Gatún utilizadas como referencia (dos años)

Subcuenca Superior (MPC)	Subcuenca Inferior (MPC)	MES
2,684	2,767	1
1,115	(1,681)	2
1,104	(2,595)	3
1,918	(1,052)	4
4,730	7,307	5
8,961	10,772	6
10,842	14,056	7
9,010	10,762	8
8,012	9,015	9
7,256	12,047	10
10,192	20,303	11
11,372	11,073	12
14,246	18,500	13
4,595	2,696	14
3,935	295	15
3,224	(1,234)	16
10,004	6,798	17
10,013	10,902	18
8,970	11,702	19
10,556	13,778	20
7,955	13,012	21
8,804	14,426	22
11,143	23,351	23
6,302	7,483	24

Lago Alhajuela	251.9	Inicial =	28,174
	251.9	Final =	28,174
		Cambio =	0 MPC
		Entradas (escorrentía neta) =	187,434
		Salidas (usos, trasvases o demandas) =	(187,434)
		Cambio =	0 MPC
		BALANCE =	0
Lago Gatún	89.0	Inicial =	201,109
	89.0	Final =	201,109
		Cambio =	0 MPC
		Entradas (escorrentía neta) =	401,915
		Salidas (usos o demandas) =	(401,915)
		Entradas - Salidas +/- Cambio Alhajuela =	0 MPC
		BALANCE =	0

	Simulación de 2 años (MPC)		Simulación de 20 años (MPC)		Embalses debajo de sus mínimos	
	Hidrogen.	Derrames	Hidrogen.	Derrames	En 2 años	En 20 años
Alhajuela	160,376	(7,563)	1,420,660	(75,639)	0 meses	2 meses
Gatún	173,281	(12,985)	1,130,129	(238,316)	0 meses	7 meses
Confiabilidad de consumo (Alhajuela) y calado (Gatún) en porcentaje (%)				Alhajuela	100.00%	99.17%
				Gatún	100.00%	97.08%

Calado máximo (pies) en Gatún un 100%del tiempo	Periodo de	Calado máx.
	En 2 años	50.88
	En 20 años	45.31

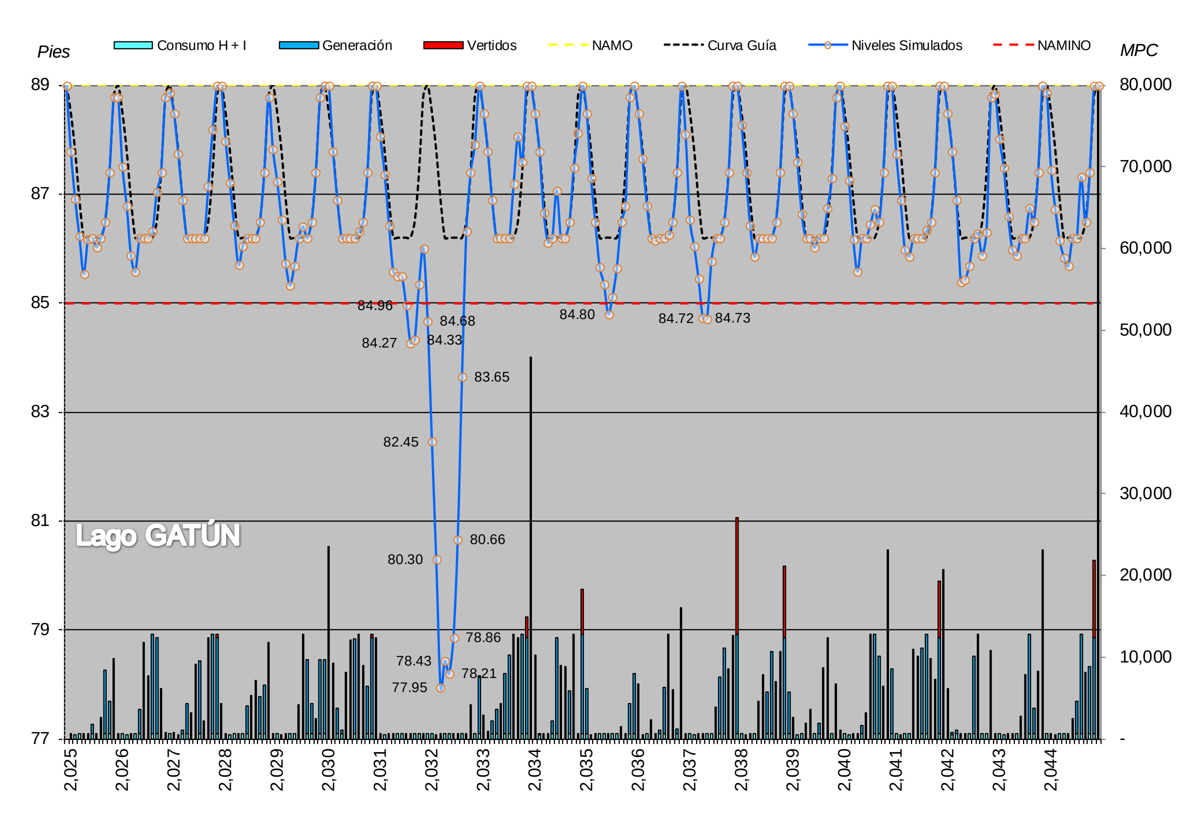
Figura 30 - Hoja de introducción de los datos y resultados del segundo escenario

3. Tercer escenario: demandas pronosticadas para el año 2025.

- Esclusajes equivalentes diarios por las estructuras existentes (24.66) y nuevas (11.90).
- Uso diario de agua por las esclusas existentes (181 MPC) y nuevas (87 MPC).
- Consumo de agua de la población por mes en Alhajuela (855 MPC) y Gatún (612 MPC).

Resultados: Se prevé restricciones de calado por 15 meses, en diversos años, siendo el periodo crítico (con aportes similares a los del fenómeno de El Niño de 1997-98) de julio 2031 a agosto 2032. La elevación mínima sería de 77.95´, correspondiente a un calado de 42.95´, en marzo del 2032. La confiabilidad para mantener un calado de 50 pies o más es de 93.8%. La figura de la siguiente página presenta la tabla de resultados del periodo crítico mencionado.

Figura 31 - Resultados del escenario #3 en el lago Gatún / Periodo 2025-2044



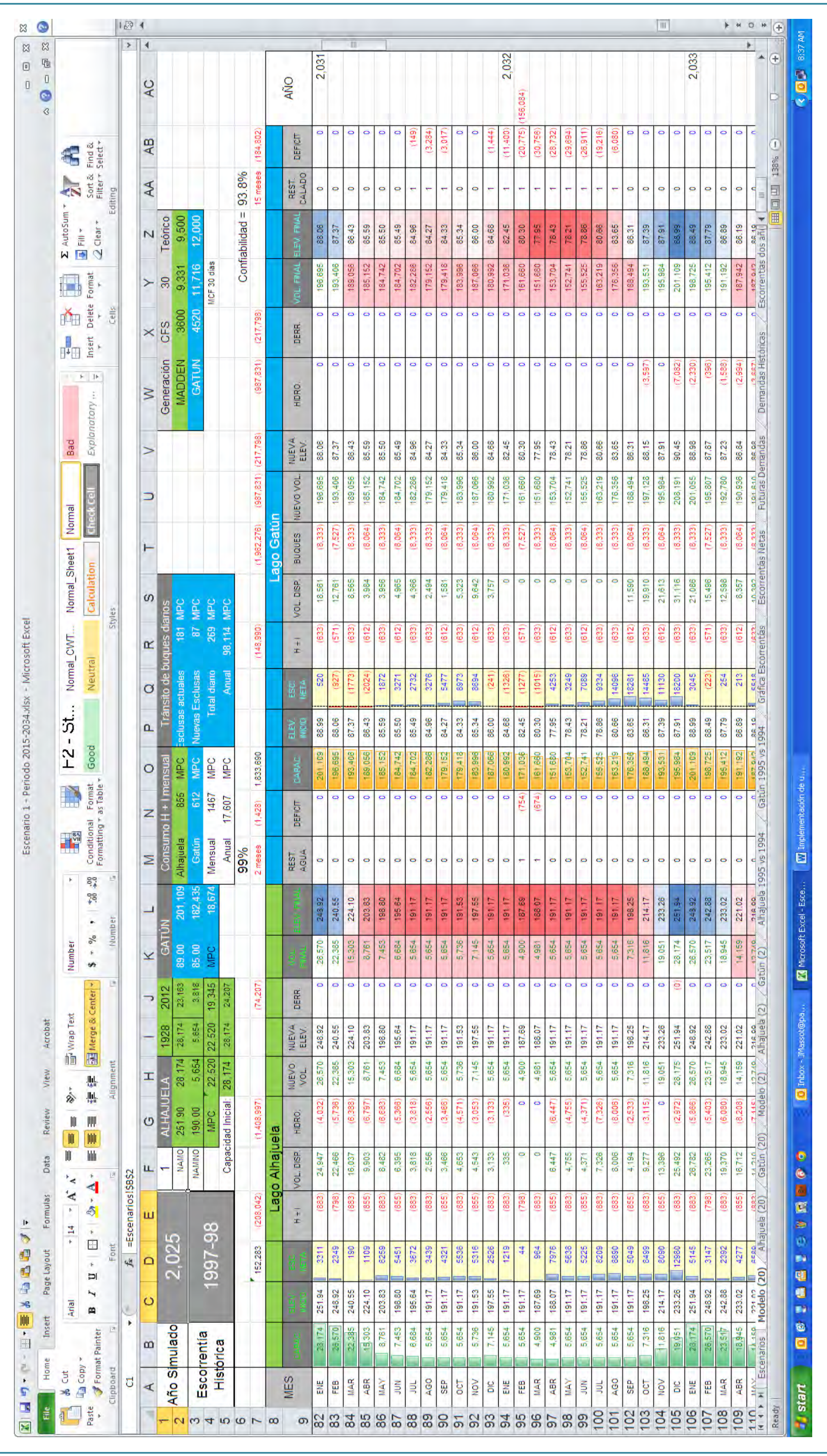
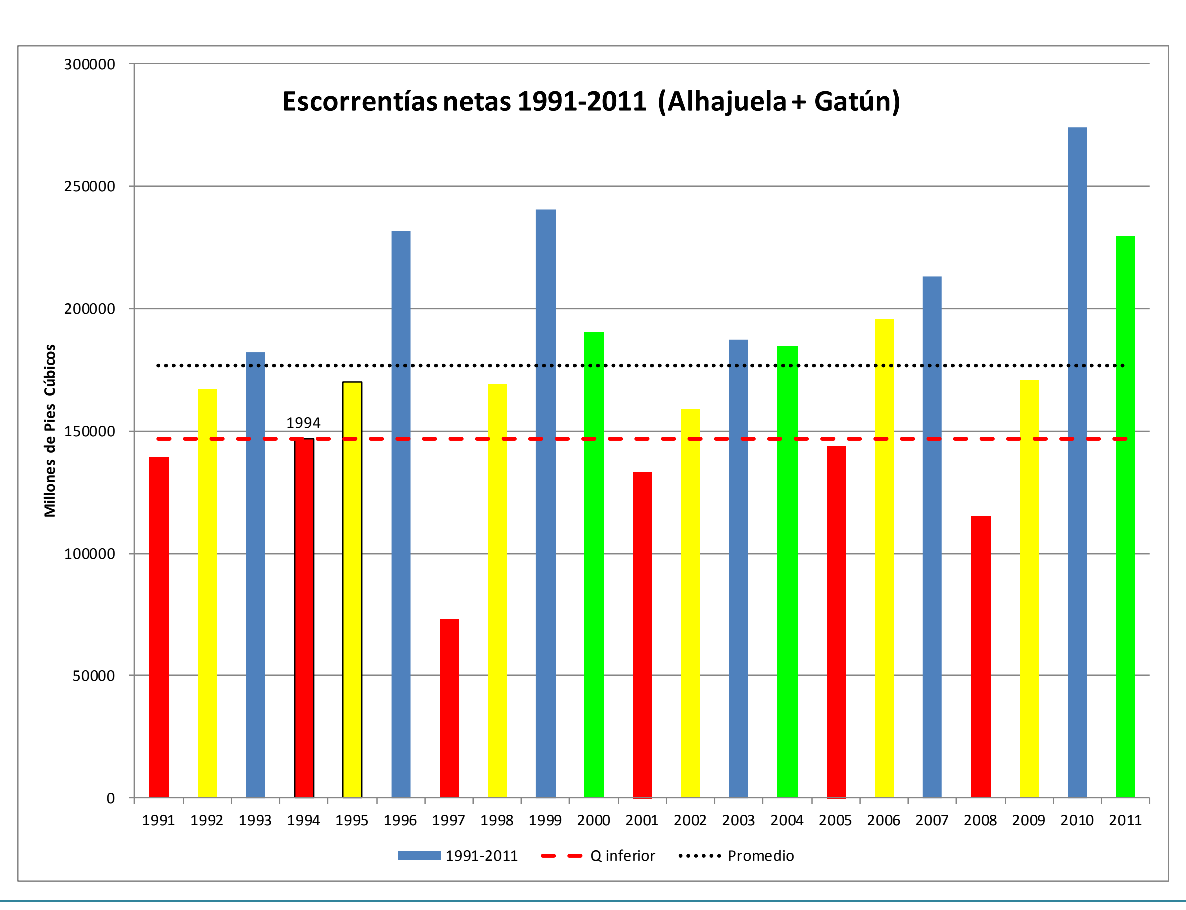


Figura 32 - Tabla de resultados del periodo crítico (2031-2032)

B. Segundo objetivo: determinar el calado máximo que el Canal de Panamá puede garantizar un 100% todo el año empleando un año normal y otro para el cuartil inferior.

Como muestra la siguiente gráfica, los aportes históricos seleccionados para simular las operaciones en un año normal y cuartil inferior corresponden a 1995 y 1994. Ya que se recomienda una simulación mínima de 18 meses a partir de enero del primer año, las escorrentías netas escogidas para el cumplimiento de este objetivo son los periodos de 1995-1996 y 1994-1995. Utilizando las demandas de agua esperadas en el año 2015, el calado máximo que puede garantizarse un 100% en un año normal como, por ejemplo, con los aportes de 1995, es de 50.92´ (ver gráfica en la siguiente página). Debido a que 1996 tuvo aportes mucho mayores que los de 1995, el calado máximo es mucho mayor (51.19´) y, como muestra la figura, igualmente la cantidad de agua utilizada para generación hidroeléctrica y, en algunos meses, vertidos de agua (enero y noviembre).

Figura 33 - Escorrentías netas anuales, año promedio y cuartil inferior



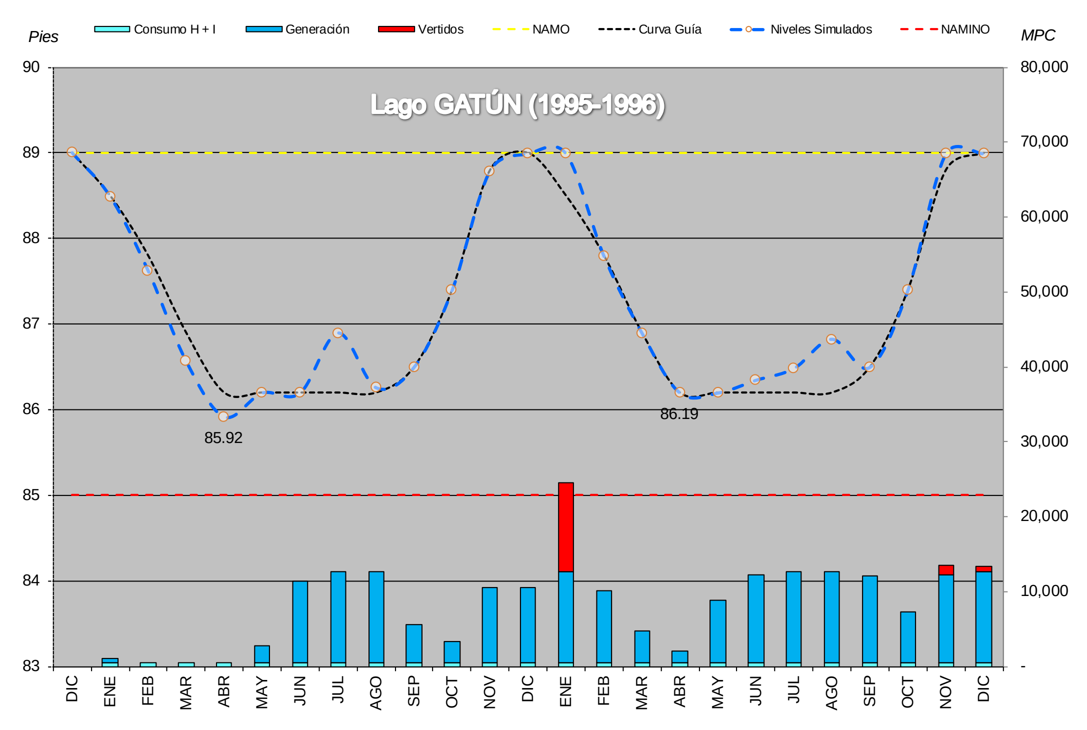
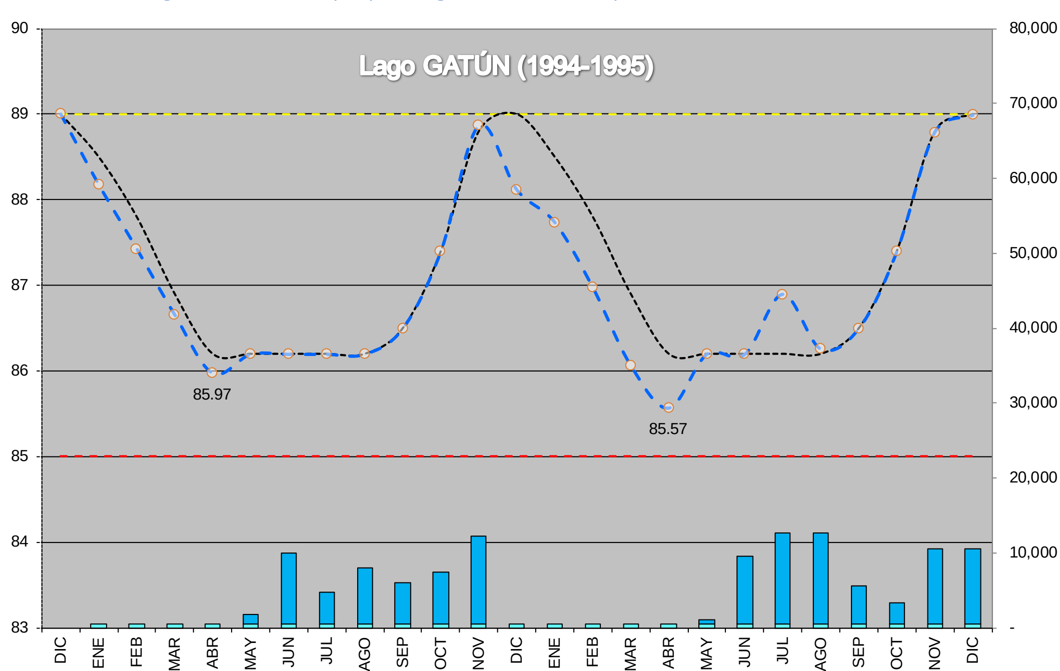


Figura 34 - Calado que puede garantizarse con aportes de un año normal (promedio)

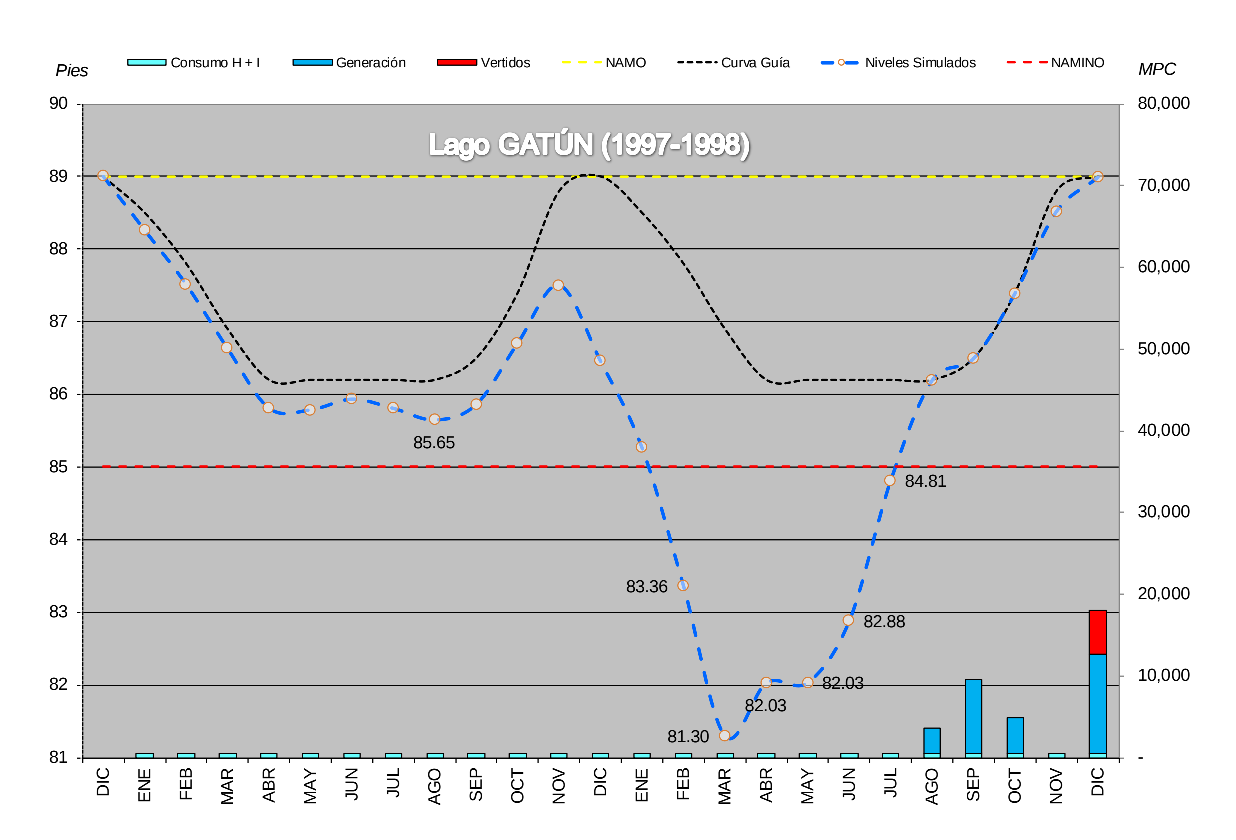
Con los aportes representativos al cuartil inferior, 1994 por ejemplo, el calado correspondiente es de 50.97´ (para el año en mención), sin embargo, el mes de diciembre de 1994 fue extremadamente seco y sus efectos se dan en 1995 (calado máximo de 50.57´).

Figura 35 - Calado que puede garantizarse con aportes acordes al cuartil inferior



En un caso extremo, con escorrentías netas similares al periodo 1997-1998 (fenómeno de El Niño extremo), el calado máximo que se puede garantizar un 100% del tiempo es 46.30´ (correspondiente a una elevación de 81.30´). Este último calado es el mismo para una simulación de dos que 20 años ya que representa el periodo crítico de aportes mínimos. Se observa, tal como se explicó en el capítulo 2, que los efectos de un año con escorrentías mínimas (1997) se presenta luego del periodo seco del siguiente año (1998). Adicionalmente, aun cuando las demandas (del año 2015) son mayores que los existentes en el periodo de 1997-1998 se nota que sólo se llega a un nivel mínimo inferior de 79.80´ (versus 78.94´el 16 de mayo de 1998) si el nivel de inicio de la simulación y el NAMO hubiesen sido de 87.50´. Lo anterior se explica ya que el modelo utiliza valores promedios mensuales por lo que se minimizan los efectos de los acontecimientos extremos en períodos de tiempo menores (días). Además, hay que tomar en cuenta los errores antes mencionados existentes en la base de datos de entrada del modelo ("*Blue Books*" o "*Dailys*").

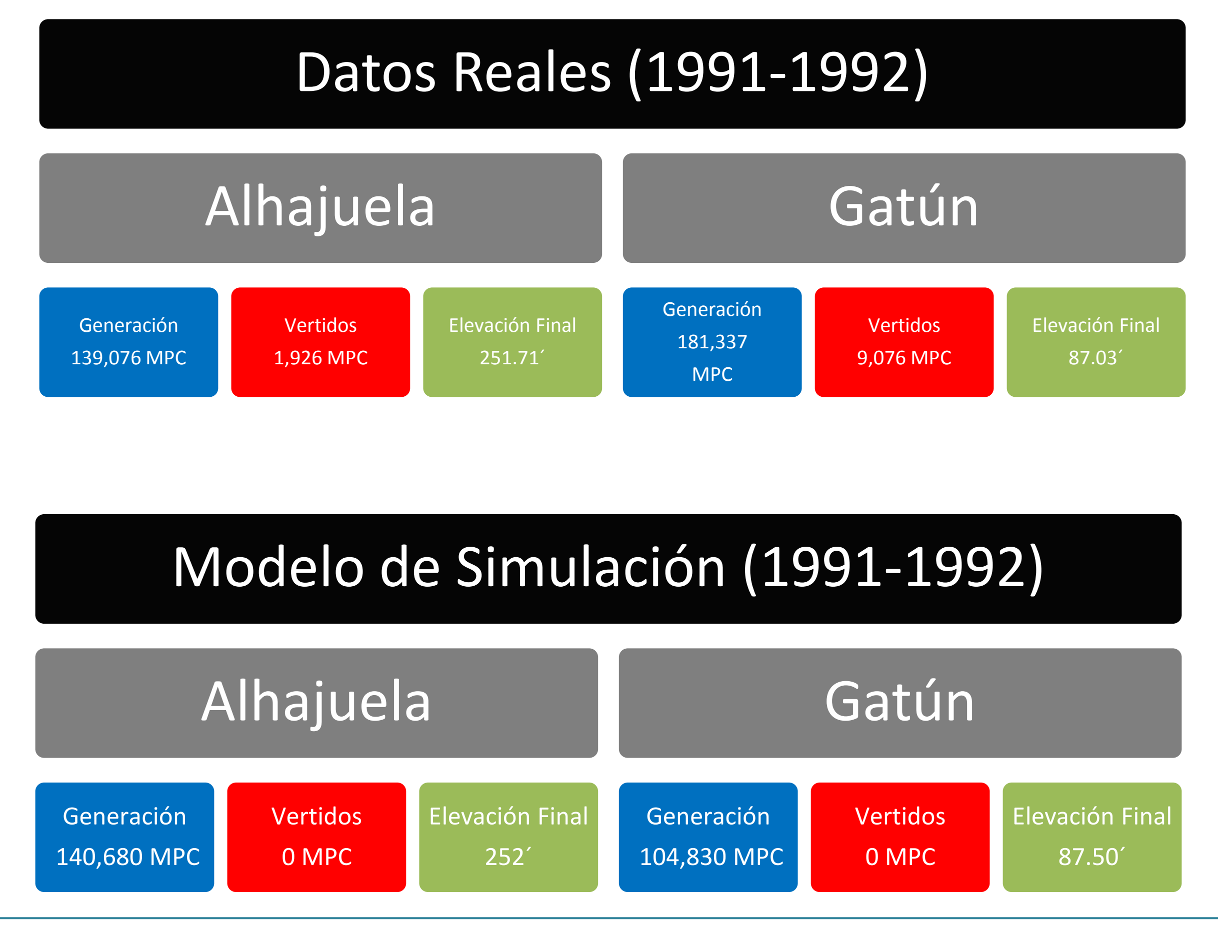
Figura 36 - Calados con la simulación de los aportes mínimos de la serie (1997-1998)



C. Tercer objetivo: comparar los resultados del modelo, en relación a las operaciones históricas realizadas en un periodo en particular, para evaluar si este optimiza el uso de los recursos hídricos del Canal o tiende a manejarlos en forma conservadora dependiendo de las reglas de operación según las prioridades de uso (consumo humano e industrial, tránsito de los buques por el Canal o generación hidroeléctrica).

Para el análisis de este objetivo se simulan las operaciones partiendo del mismo nivel inicial histórico (Alhajuela = 250.31´ y Gatún = 87.37´) con los datos del primer periodo de la serie evaluada (1991-1992) de acuerdo a la información guardada en los "Blue Books" (generación hidroeléctrica y vertidos) en comparación con la simulación siguiendo las reglas de operación del modelo. Como se observa en la siguiente tabla y gráficas subsecuentes, el modelo optimiza el uso de los recursos hídricos, es decir, hay mayor generación hidroeléctrica, menor cantidad de agua derramada y los embalses llegan a sus elevaciones máximas operativas al final del periodo de simulación (se asumió igual cantidad de agua para el consumo humano e industrial).

Figura 37 - Resultados de operaciones históricas versus el modelo de simulación (1991-1992)



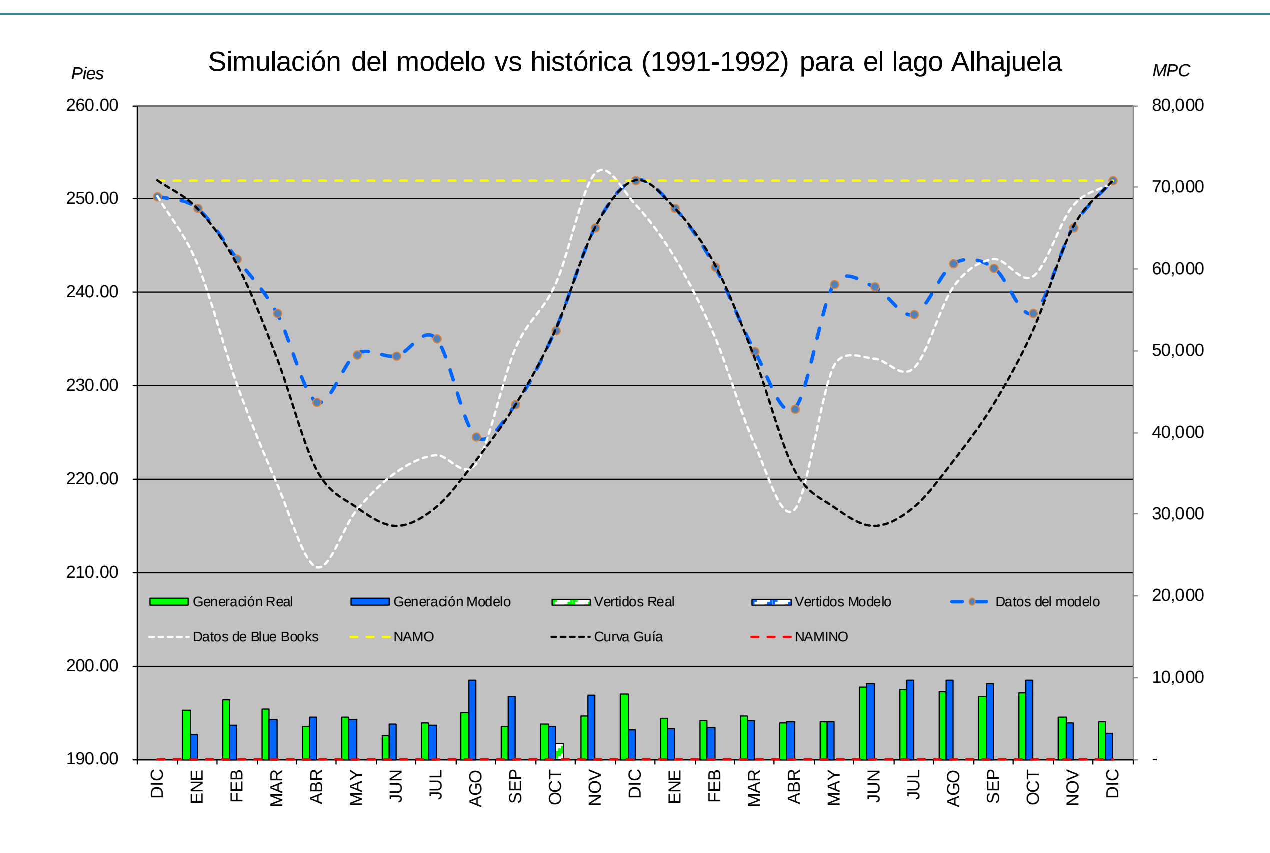
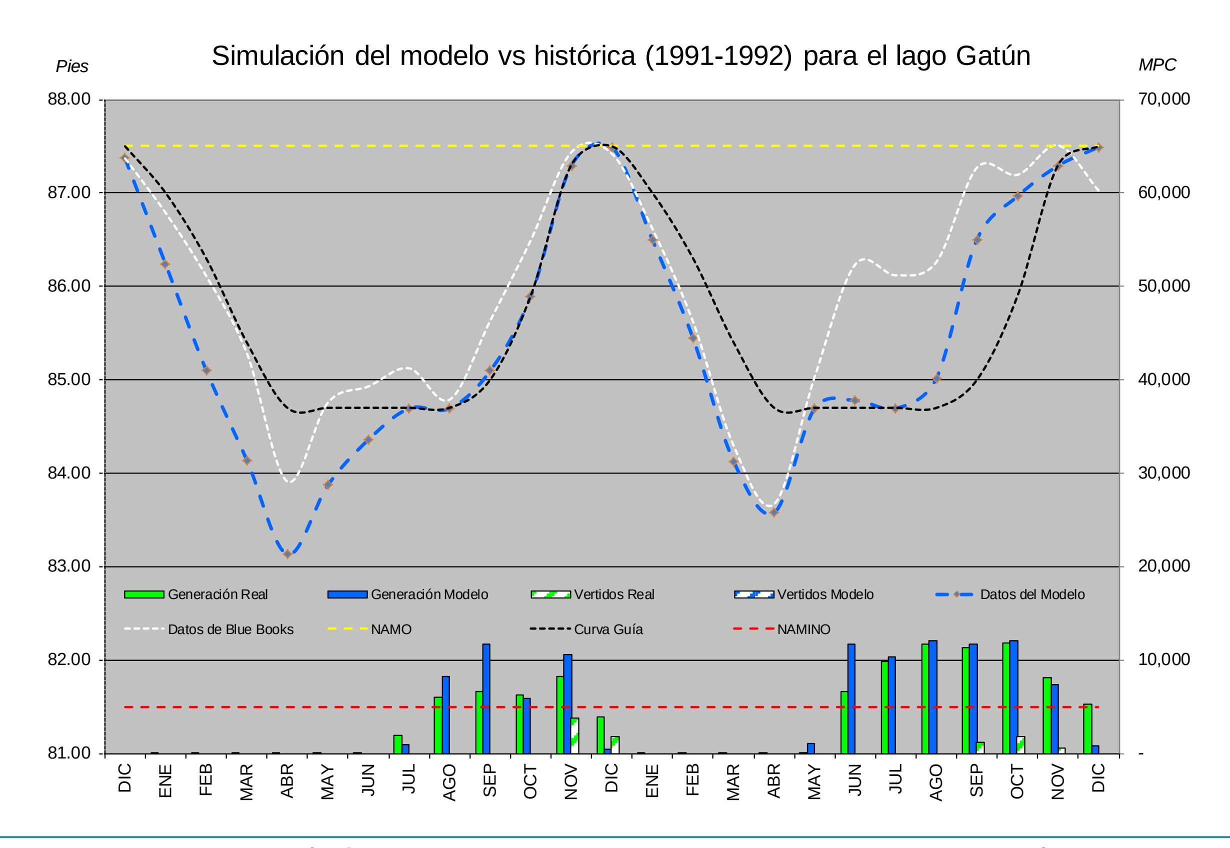


Figura 38 - Gráfica de optimización del modelo versus operaciones históricas (1991-1992)



V. Conclusiones y recomendaciones

1. El objetivo general de este proyecto, o sea, implementar un modelo de simulación de operaciones como herramienta para la evaluación y toma de decisiones sobre las necesidades hídricas del Canal ampliado, ha sido cumplido a cabalidad. Se sugiere una revisión de los algoritmos del modelo para comprobar su funcionamiento, por personal de la sección, antes de oficializar o transmitirlos a niveles jerárquicos superiores.
2. El análisis de los resultados al simular los aportes del periodo de 1991 a 2010 y las demandas para los escenarios pronosticados para los años 2015, 2020 y 2025 muestra que habrá restricciones para un calado de 50´ en los años con aportes acordes al fenómeno de El Niño (como en el periodo de 1997-1998). Para el periodo 2015-2034, se prevé restricciones de calado por seis meses (de febrero a julio) en el año 2022. La confiabilidad correspondiente a la simulación de estos 20 años es de 97.5%. Las elevaciones mínimas que alcanzan los embalses, Alhajuela y Gatún, son de 188.17´y 81.30´. El calado máximo que se puede mantenerse un 100% del tiempo será de 46.30´. La confiabilidad para un calado de 50´ y el calado máximo que puede garantizarse un 100% del tiempo para los periodos 2020-2039 y 2025-2044 son, respectivamente, las siguientes: 97.1% / 45.31´ y 93.8% / 42.95´.
3. En septiembre de 2012 se publicó, extraoficialmente, la nueva relación elevación-capacidad del embalse de Alhajuela. Esto permite actualizar las ecuaciones existentes de la pasada batimetría realizada en el año 2008, sin embargo, las nuevas tablas también incluyen correcciones a la batimetría original de 1928. Este cambio (pérdida) de capacidad operativa debido a la revisión (un 2% aproximadamente) cambia toda la relación elevación-capacidad del modelo propuesto en este trabajo.
4. El modelo permite optimizar la administración de los recursos hídricos de acuerdo a las curvas guías existentes o propuestas. Es recomendable evaluar, mediante la aplicación del modelo de simulación, las futuras curvas guías del Canal ampliado y obtener resultados preliminares de su factibilidad. Lo anterior reducirá drásticamente el número de curvas potenciales así como su periodo de prueba, evaluación y análisis. Adicionalmente, permitirá determinar cuál curva guía optimiza de forma más eficiente el uso del recurso hídrico y minimiza los periodos con restricciones de calado.